



**INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN SALINA EN TRATAMIENTO TÉRMICO  
DEL ACERO HADFIELD**

**LUIS FERNANDO ROLDAN GUTIERREZ  
DIEGO YESID CARDENAS GARAVITO**

**UNIVERSIDAD ESCUELA COLOMBIANA DE CARRERAS INDUSTRIALES  
FACULTAD DE INGENIERIA  
INGENIERIA MECANICA  
BOGOTÁ, D.C.**

**2016**

**INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN SALINA EN TRATAMIENTO TÉRMICO  
DEL ACERO HADFIELD**

**LUIS FERNANDO ROLDAN GUTIERREZ**

**DIEGO YESID CARDENAS GARAVITO**

**DIRECTOR (A):**

**MSC. ING. SANDRA PATRICIA ROMERO NIETO**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:  
MATERIALES Y PROCESOS DE MANUFACTURA**

**UNIVERSIDAD ESCUELA COLOMBIANA DE CARRERAS INDUSTRIALES**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**INGENIERIA MECANICA**

**BOGOTÁ, D.C.**

**2016**

Este trabajo está dedicado a nuestro Dios porque gracias a él tenemos la sabiduría que hace posible nuestro pensamiento de la misma manera dedicamos este trabajo a nuestras Familias las cuales cada día se esmeran por ayudarnos a conseguir un mejor futuro, en especial nuestros Padres los cuales son un motor de ayuda moral y económica constante.

Fernando Roldan

Diego Cárdenas

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan su agradecimiento

A nuestra Directora Msc. Ing. Sandra Patricia Romero Nieto por brindarnos sus conocimientos y experiencia en el campo de materiales y procesos.

Por el préstamo del laboratorio de materiales al Ingeniero Andrés Guevara y sus colaboradores.

A la Universidad ECCI por facilitarnos los equipos y herramientas necesarias para la ejecución del proyecto.

Agradecemos a Industrias Magma S.A. por trabajar en conjunto y brindar la información y acceso a los diferentes procesos de fabricación para la realización de este Proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>9</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>11</b>
ABSTRACT.....	12
<b>CAPITULO 1.....</b>	<b>14</b>
<b>MARCO TEÓRICO: .....</b>	<b>14</b>
HISTORIA ACEROS HADFIELD .....	14
<b>GENERALIDADES DEL ACERO HADFIELD .....</b>	<b>16</b>
APLICACIONES DE ACEROS AL MANGANESO EN LOS DIFERENTES CAMPOS INDUSTRIALES .....	18
MAYOR CONTENIDO DE MANGANESO EN ACEROS.....	20
PRACTICA DE FUNDIDO PARA ACEROS AUSTENÍTICOS.....	20
ESTRUCTURA CRISTALINA DE LOS METALES.....	21
<i>Estructura de las aleaciones</i> .....	22
<i>Soluciones sólidas</i> .....	22
<i>Soluciones sólidas intersticiales</i> .....	23
FASE AUSTENÍTICA .....	24
<b>ANTECEDENTES .....</b>	<b>28</b>
ACEROS AL MANGANESO MODIFICADOS.....	30
ACERO MODIFICADO CON CROMO .....	34

<b>MARCO LEGAL .....</b>	<b>35</b>
<b>CAPITULO 2.....</b>	<b>36</b>
PROCESO DE FUNDICIÓN DEL ACERO ASTM A128 EN INDUSTRIAS MAGMA .....	36
<i>Fundición del Acero.....</i>	36
<i>Proceso de vaciado.....</i>	37
<b>CAPITULO 3.....</b>	<b>39</b>
PROCESO EXPERIMENTAL “FACTORES RELEVANTES TRATAMIENTO TÉRMICO” .....	39
<i>Temperatura aproximada .....</i>	39
<i>Tiempo de Permanencia .....</i>	39
<i>Medios de enfriamiento “Solución salina” .....</i>	40
<i>Diseño de experimental .....</i>	40
<i>Caracterización del acero templado.....</i>	41
<i>Ejecución parte experimental .....</i>	42
<b>CAPITULO 4.....</b>	<b>44</b>
RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	44
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>55</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>56</b>
<b>GLOSARIO .....</b>	<b>57</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>59</b>

## Lista de Figuras

Ilustración 1 Microestructura del acero Hadfield; matriz clara de Austenita y precipitado en el borde de grano de $(\text{Fe, Mn})_3\text{C}$ Tomado de microscopia óptica (Moghaddam, Varahram, & Davami, 2011).....	16
Ilustración 2. Diagrama de fase del acero Hadfield obtenido del thermo-calc software (Ashok & Karabi, 2008) .....	17
Ilustración 3 Mandíbula Fija en Acero Hadfield Trituradora Loro & Parissini Fuente: Industrias Magma.....	19
Ilustración 4. Estructura Cubica Centrada en las caras (FCC) (William D. Callister, 2001)...	25
Ilustración 5. Diagrama de dependencia de la Temperatura Eutectoide en Aleaciones de elementos concentrados (callister, 2009) .....	26
Ilustración 6. Microestructura del acero austenítico con 10,04 % wt de vanadio, muestra una matriz Austenítica con un precipitado oscuro de carburos de vanadio (flechas azules) y un precipitado claro en menor proporción de $(\text{Fe, Mn})_3\text{C}$ (flechas blancas). Tomada de SEM a 200X (Moghaddam, Varahram, & Davami, 2011) .....	31
Ilustración 7. Microestructuras del acero austenítico en condición de fundido con alto porcentaje de vanadio y diferentes porcentajes de Carbono en su composición. La matriz corresponde a la Austenita y las áreas oscuras el carburo de vanadio precipitado. Tomado del SEM (Moghaddam, Varahram, & Davami, 2011).....	32
Ilustración 8. Acero con 9,91 % V, antes y después de tratamiento térmico de temple. Microestructura tomada con microscopia óptica. Matriz de Austenita y precipitado de carburos de vanadio (Moghaddam, Varahram, & Davami, 2011) .....	33

Ilustración 9 Tenacidad al impacto de los aceros de acuerdo a su composición química (Moghaddam, Varahram, & Davami, 2011).....	34
Ilustración 10 Acero vertido del horno a la cuchara Fuente: Industrias Magma .....	36
Ilustración 11 Proceso de vaciado del horno a una temperatura aproximada de 1400°C Fuente: Industrias Magma.....	37
Ilustración 12 perfiles de dureza del acero con molibdeno a las temperaturas T1 y T1-60°C enfriados en agua .....	49
Ilustración 13 Comparación entre las microestructuras a 100 X .....	52
Ilustración 14 Comparación de las microestructuras de los tratamientos que presentaron mayor homogeneidad en el perfil de dureza. Fuente: Los Autores .....	54



## Lista de Tablas y Graficas

Tabla 1 Rangos de composición estándar para fundiciones de aceros austeníticos al manganeso (ASM Handbook Vol 1, Properties and Selection: Irons, steels and High Performance Alloys. p1274., 2005).....	27
Tabla 2. Composición química del acero Hadfield y el acero al manganeso modificado (Tianfu & Fucheng, 1997) .....	34
Tabla 3. Diseño de experimentos tipo factorial Fuente: los autores .....	41
Tabla 4. Diseño de experimentos para la caracterización del acero templado.....	42
Tabla 5. Tamaño de grano a 100X probetas a diferentes medios de enfriamiento y temperatura. Fuente: Los Autores.....	44
Tabla 6 comparación análisis químico probetas con Mo, sin Mo contra Norma ASTM A12850	
Grafica 1 resultados de dureza probetas TT con agua. ....	48
Grafica 2. Resultados de dureza de probetas TT con diferentes concentraciones de NaCl en medio de enfriamiento Fuente: Este estudio .....	51
Grafica 3. Mejores Perfiles de Dureza TT en Agua y NaCl. Fuente: Los Autores.....	52

## INTRODUCCION

El acero Hadfield actualmente tiene gran variedad de aplicaciones en la industria; se utiliza ampliamente con pequeñas modificaciones en composición y tratamiento térmico; las áreas de principal aplicación son el movimiento de tierra, minería, explotación de canteras, perforación de pozos de petróleo, fabricación de acero, dragado, explotación forestal y fabricación de herramientas para la obtención de materia prima de productos como cemento y arcilla. (ASM Handbook Vol 1, Properties and Selection: Irons, steels and High Performance Alloys. p1274., 2005)

Denominado ASTM A 128 o tipo Hadfield corresponde a una aleación caracterizada por sus altos porcentajes de manganeso en donde sus contenidos aproximados son 12 a 14 % Mn y 1,0 a 1,4% C dentro de su composición química ideal. Estos aceros son conocidos como Hadfield debido a su descubridor Sir Robert Hadfield. La microestructura de estos aceros es Austenítica y su aplicación como materia prima en herramientas de trituración e impacto es abundante. (ASM Handbook Vol 1, Properties and Selection: Irons, steels and High Performance Alloys. p1274., 2005)

Por lo tanto para Industrias Magma es de gran relevancia el empleo de este acero en la fabricación de los martillos de trituración que actualmente comercializa, los cuales cumplen con los estándares de composición química establecidos para el grado ASTM A – 128.

Industrias Magma ha observado el prematuro desgaste de los martillos de trituración fabricados en acero Hadfield ASTM A 128 debido a las operaciones de alto impacto a las cuales está expuesto este material; por este motivo, se busca una mejor homogeneidad en el perfil de dureza desde la periferia hasta el corazón de la pieza. Solo encontrando una microestructura idónea, es posible lograr un aumento en la tenacidad de dicho material, por tal motivo, podría esperarse un mejor desempeño en las herramientas expuestas a operaciones de alto impacto.

En el proceso de fundición del acero ASTM A-128, Industrias Magma actualmente utiliza molibdeno en pequeñas cantidades para mejorar la templabilidad del acero y conseguir una estructura más uniforme después del tratamiento térmico, la utilización de este elemento conlleva a un aumento en el costo de producción que se ve reflejado en el precio de venta final. Por lo cual se hace necesario implementar un estudio para verificar si al omitir la utilización del molibdeno y cambiar la composición del medio de enfriamiento en el proceso de temple, se logre conseguir una microestructura igual o mejor a la que actualmente se obtiene.

La búsqueda de un medio de enfriamiento alternativo basados en estudios anteriores referentes a este material indicaron que una solución salina muestra una mayor disipación de energía en el temple; encontrar la solución ideal en ciertas concentraciones genera un perfil de dureza más homogéneo en el acero ASTM A 128 sin molibdeno.

Cabe resaltar que Industrias Magma ha brindado información y materiales para la investigación, tales como el análisis de composición química y datos del proceso de producción de su acero, brindando un punto de partida en el desarrollo de esta investigación. Además de

fundir el acero, la compañía realiza tratamientos térmicos de temple y revenido a los materiales con el fin de mejorar sus propiedades.

Relacionar las condiciones de enfriamiento con la microestructura y el perfil de dureza es de vital importancia para el control de calidad del acero ASTM A-128 Fabricado en Industrias Magma.

## **RESUMEN**

El acero ASTM A 128 también llamado Hadfield, tiene la característica de brindar un rendimiento eficiente en operaciones de alto impacto y abrasión, lo que hace de este, un material favorable en operaciones de minería. El propósito de este trabajo es la determinación de las condiciones idóneas en el medio de enfriamiento del temple (solución salina) que logre obtener un perfil de dureza más homogéneo en el Acero ASTM A-128.

En este trabajo se efectuó el temple al acero ASTM A-128 sin molibdeno y su enfriamiento se realizó a diferentes concentraciones de NaCl (0,6%pe, 1,2%pe, 1,8%pe, 2,4%pe y 3%pe respectivamente); se realizó la caracterización en cuanto al tamaño de grano de acuerdo a la norma NTC 1174, microconstituyentes y perfil de dureza, los resultados indican que el perfil de dureza más homogéneo se logró utilizando una concentración salina de 3% en el medio de enfriamiento, debido a un tamaño de grano más fino en su microestructura, respecto a los demás tratamientos.

De la misma manera se caracterizó el acero ASTM A-128 con molibdeno tratado térmicamente bajo las condiciones normales de fabricación de industrias Magma, para determinar la diferencia en el perfil de dureza respecto al acero sin molibdeno tratado con las diferentes concentraciones de NaCl; con el fin de estudiar la posibilidad de reducción del uso de molibdeno en el proceso de fabricación.

**Palabras Claves:**

ASTM A128, NTC 1174, Hadfield, perfil de dureza, NaCl

**ABSTRACT**

ASTM A128 steel also called Hadfield has the characteristic of providing an efficient performance in high impact and abrasion operations, which makes it a favorable material in mining operations. The purpose of this work is to determine the ideal conditions in the quench cooling medium (saline solution) that achieves a most homogeneous hardness profile in ASTM A-128 Steel.

Quenching was performed on ASTM A-128 steel without molybdenum and its cooling was performed at different concentrations of NaCl (0.6% wt, 1.2% wt, 1.8% wt, 2.4% wt and 3% wt, respectively); the grain size characterization was performed according to NTC 1174, the microstructural analysis and hardness profile were performed. The results indicate that the most homogeneous hardness profile was achieved using a 3% wt saline concentration of NaCl in the cooling medium, due to a finer grain size in its microstructure, compared to other treatments.

In the same way, the ASTM A-128 steel with molybdenum thermally treated under the normal manufacturing conditions of Magma industries was characterized to determine the

difference between the hardness profiles according to steel without molybdenum treated with the different concentrations of NaCl; In order to study the possibility of reducing the use of molybdenum in the manufacturing process.

**Keywords:**

**ASTM A128, NTC 1174, Hadfield, hardness profile, NaCl**

## CAPITULO 1

### MARCO TEÓRICO:

#### Historia Aceros Hadfield

Fue inventado por Sir Robert Hadfield <sup>1</sup> en 1882 de aquí su nombre de Acero Hadfield. Posteriormente se registró en la oficina de patentes de Estados Unidos como manufactura de acero al manganeso, (ASM Handbook Vol 1, Properties and Selection: Irons, steels and High Performance Alloys. p1274., 2005, p. 1274)

Según registros el primer acero al manganeso fue producido en París por Terre Noire Company, luego Alexandre Pourcel lo perfeccionó agregando ferro manganeso, posteriormente se necesitaron diferentes investigaciones para mejorar características de este acero y lo hizo el señor Robert Hadfield el cual añadió diferentes elementos aleantes, algunos como silicio y manganeso, y después de varios experimentos y tratamientos térmicos con aceros al manganeso concluyó que el acero al manganeso en porcentajes mayores al 10 % adquiriría mayor tenacidad después del temple. Es de resaltar que el patentó los aceros que contenían manganeso entre 7 y 20 % de dicha concentración entre 1883 y 1884. (E., 2004)

---

<sup>1</sup> Sir Robert Abbott Hadfield, (28 November 1858, Sheffield U.K. - 30 September 1940, Surrey U.K.) metalurgista inglés.

Sir Robert Hadfield también publicó más de 200 artículos sobre sus investigaciones metalúrgicas e hizo parte de la Royal Society en 1909 en donde recibió muchos reconocimientos por sus investigaciones y descubrimientos, que le merecieron un puesto en la historia del acero. (Giraldo)

Posterior a Hadfield; Floris Osmond un Ingeniero y Metalurgista Francés Padre de la metalografía, demostró la estabilidad de la estructura de estos aceros a altas temperaturas y le dio el nombre de Austenita en honor al metalurgista Robert Austen.

Años más tarde T. Norman introdujo el concepto aceros austeníticos meta-estables donde proponía diferentes porcentajes en los elementos aleantes para dar mayor resistencia a la abrasión y mayor tenacidad. (E., 2004)

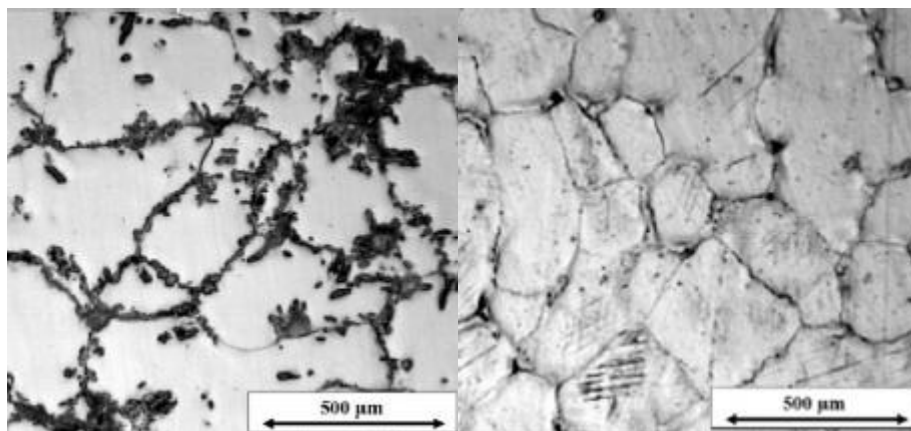
El Acero Hadfield fue único ya que combinó elevada tenacidad y ductilidad con alta capacidad de endurecimiento por trabajo y usualmente buena resistencia al desgaste. Consecuentemente, este obtuvo rápida aceptación, como un material muy útil en Ingeniería. (ASM Handbook Vol 1, Properties and Selection: Irons, steels and High Performance Alloys. p1274., 2005)

En la actualidad, todavía, se emplea ampliamente el acero Hadfield, con algunas variaciones en su composición que implican, fundamentalmente, modificaciones en el contenido en carbono y manganeso, así como el empleo de diferentes proporciones de elementos aleantes, como cromo, vanadio, níquel, molibdeno, aluminio, nitrógeno, entre otros.



### Generalidades del Acero Hadfield

El acero austenítico al manganeso original contiene cerca de 1.0 al 1,4% C y del 12 a 14 % Mn, que luego de fundido presenta una fase estable de Austenita (Moghaddam, Varahram, & Davami, 2011) (C., 1981) (Hadfield, 10 August 1917) y fases dispersas de carburos  $(\text{Fe, Mn})_3\text{C}$  (Ashok & Karabi, 2008) que se alojan en los límites de grano de la Austenita como se muestra en la ilustración (1a), (Moghaddam, Varahram, & Davami, 2011) (Ashok & Karabi, 2008). Luego de tratamiento térmico (T.T.) notamos la disminución en la cantidad de carburos en los límites de grano y una gran cantidad de ellos dispersos en la matriz austenítica, como se aprecia en la ilustración (1b).



a. Acero Hadfield luego de fundido

b. Acero Hadfield luego de templado en agua

Ilustración 1 Microestructura del acero Hadfield; matriz clara de Austenita y precipitado en el borde de grano de  $(\text{Fe, Mn})_3\text{C}$  Tomado de microscopía óptica (Moghaddam, Varahram, & Davami, 2011)

El acero Hadfield no es magnético (Hadfield, 10 August 1917) debido a que presenta como fase predominante Austenita, en la cual los átomos de hierro se encuentran en un ordenamiento

cúbico centrado en las caras (fcc). El acero Hadfield mejora su resistencia a la fluencia por el endurecimiento por solución sólida y por precipitación lograda por elementos de aleación como el Cr, Mo y Ti (Handbook, 1993).

La ilustración 2 muestra el diagrama de fase del acero Hadfield obtenido de thermo-calc software (Ashok & Karabi, 2008)

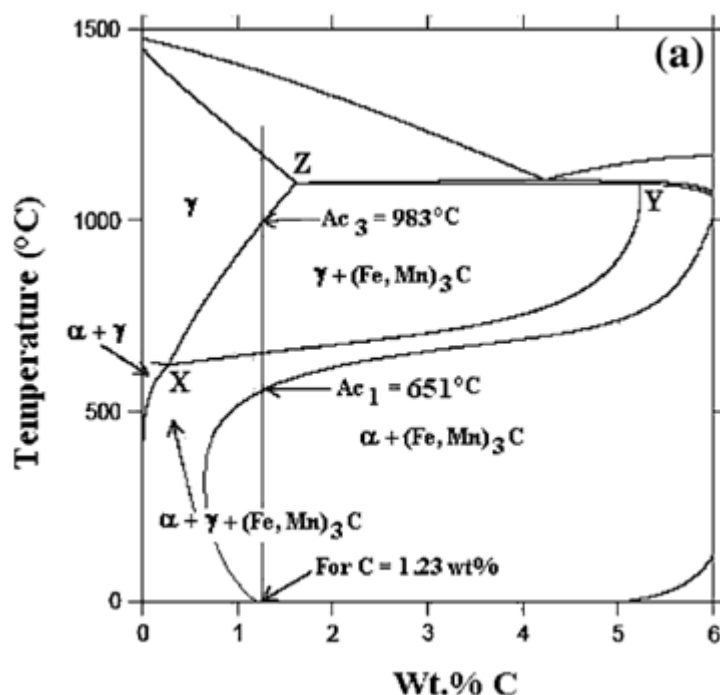


Ilustración 2. Diagrama de fase del acero Hadfield obtenido del thermo-calc software (Ashok & Karabi, 2008)

Ciertas propiedades del acero austenítico al manganeso tienden a restringir su uso; algunas de estas son, la dificultad para maquinarse y su usual resistencia a la fluencia que oscila entre 345 a 415 MPa (50 a 60 KSI). Consecuentemente, este no es muy adecuado para partes que requieren mecanizado con pequeñas tolerancias o que deban resistir grandes deformaciones plásticas cuando sean sometidas a grandes esfuerzos en servicio. Sin embargo, martilleo, prensado,

laminado en frío, o una explosión impactante en la superficie, aumenta el límite elástico para proveer una dureza superficial en el duro núcleo estructural. (ASM Handbook Vol 1, Properties and Selection: Irons, steels and High Performance Alloys. p1274., 2005)

### **Aplicaciones de aceros al manganeso en los diferentes campos industriales**

Los aceros austeníticos al manganeso son usados en equipos para el manejo y procesamiento de minerales (tales como trituradoras, revestimientos de molinos, trituradoras de mandíbulas, martillos de impacto, placas no magnéticas [2], cucharones de dragado, cucharones de palas mecánicas y sus dientes, y bombas para manipulación de grava y rocas). Otras aplicaciones incluyen bandas de rodamiento de oruga para tractores, caminos ferroviarios, y gratas para reciclaje de automóviles además aplicaciones militares como zapatas para las orugas de los tanques de guerra. (ASM Handbook Vol 1, Properties and Selection: Irons, steels and High Performance Alloys. p1274., 2005, p. 1274)

Esta aleación se caracteriza por presentar un notable endurecimiento por deformación (C., 1981).

Otro uso importante se encuentra en componentes de vías férreas tales como los entrecruzamientos, denominados comúnmente como ranas además de las conmutadoras y cruces, donde los impactos de las ruedas en dichas intersecciones son especialmente fuertes. Debido a que el acero al manganeso austenítico es resistente al desgaste metal-metal, se utiliza también en piñones, engranajes, cadenas transportadoras, placas de desgaste, zapatas y ruedas dentadas de

tractores de oruga, excavadoras y demás maquinaria de explotación minera y de construcción. (ASM Handbook Vol 1, Properties and Selection: Irons, steels and High Performance Alloys. p1274., 2005, p. 1274)

Específicamente el acero ASTM A 128 es un acero aleado que gracias a la combinación de sus elementos aleantes, alcanzan diversas propiedades que otras aleaciones no logran. Por lo tanto las características y aplicaciones que este acero ofrece son variadas, como ya se ha mencionado; sin embargo gracias a nuestra incursión como estudiantes e investigadores, se encontró que en la industria nacional su uso más representativo está puesto en las operaciones mineras; se llega a esta conclusión, porque en las minas de carbón, caliza, y en las canteras de roca, se usan de manera general, equipos de construcción pesada que involucran cucharones con placas antidesgaste, cuchillas-antidesgaste, dientes de corte, además de algunas plantas de trituración las cuales usan herramientas de corte como los mandíbulas de trituración, un ejemplo de ello son las trituradoras Loro & Parissini, de casa Italiana que son una marca reconocida en el campo minero. La ilustración 3 muestra una mandíbula de una trituradora Loro & Parissini.



Ilustración 3 Mandíbula Fija en Acero Hadfield Trituradora Loro & Parissini Fuente: Industrias Magma

## **Mayor contenido de manganeso en aceros**

Los aceros austeníticos con un mayor contenido de manganeso ( $Mn > 15\%$ ) han sido recientemente desarrollados para aplicaciones que requieren baja permeabilidad magnética, del orden de micras “ $\mu$ ”, resistencia a baja temperatura (criogénica), y la buena tenacidad a baja temperatura.

Estas aplicaciones se derivan del desarrollo de tecnologías superconductoras utilizadas en los sistemas de transporte, investigaciones de fusión nuclear y para satisfacer la necesidad de materiales estructurales para almacenar y transportar gases licuados.

Para tener una baja permeabilidad magnética, estas aleaciones tienen un contenido de carbono inferior a los aceros Hadfield regulares. La correspondiente pérdida en el límite de fluencia se compensa mediante la aleación de vanadio, nitrógeno, cromo, molibdeno, y titanio. El cromo también imparte resistencia a la corrosión, ya que se requiere en algunas aplicaciones criogénicas. (ASM Handbook Vol 1, Properties and Selection: Irons, steels and High Performance Alloys. p1274., 2005, p. 1281)

## **Practica de fundido para aceros austeníticos**

Los aceros austeníticos al manganeso se producen más comúnmente en hornos de arco eléctrico y de inducción en algunos casos, utilizando una práctica básica de fusión; los materiales

de carga típicos incluyen carbono y chatarra de acero al manganeso, ferromanganeso al alto carbono, ferrosilicio y silicio-manganeso.

Algunos elementos aleantes tales como cromo, molibdeno y vanadio se añaden usualmente como ferroaleaciones, mientras que elementos como el níquel se usan en un estado metálico casi puro. El proceso de desoxidación del acero se lleva a cabo con aluminio antes de vertido y en la gran mayoría de las piezas de fundición, la temperatura de este vertido se regula a menos de 1470 ° C (2680 ° F), con lo cual se evita un tamaño de grano excesivamente grueso y se minimiza la segregación química y otros defectos de fundición relacionados.

En este tipo de fundición se producen la gran mayoría de piezas en moldes de arena de olivino en lugar de arena de sílice para evitar la reacción molde-metal.

El tamaño de grano de aceros al manganeso forjado es por lo general mucho menor que el de piezas de fundición debido a la recuperación y recristalización de los granos de Austenita durante el proceso de laminación en caliente. (ASM Handbook Vol 1, Properties and Selection: Irons, steels and High Performance Alloys. p1274., 2005, p. 1283)

### **Estructura cristalina de los metales**

Cuando los metales se solidifican a partir de un estado fundido, los átomos se arreglan por sí mismos en diversas configuraciones ordenadas, denominadas cristales, y a este arreglo se le llama estructura cristalina. Al grupo más pequeño de átomos que muestran la estructura de red característica de un metal en particular se le conoce como **celda unitaria**. Es el bloque primario de un cristal, y un monocristal puede tener varias celdas unitarias. (KALPAKJIAN, 2008, pág. 47)

Los tres arreglos atómicos básicos en los metales son:

1. Estructura cúbica centrada en el cuerpo (**BCC**)
2. Estructura cúbica centrada en las caras (**FCC**)
3. Estructura hexagonal

### **Estructura de las aleaciones**

La estructura básica de los elementos, hace notar que los átomos son todos del mismo tipo, excepto por la rara presencia de átomos de impurezas. A estos metales, se les conoce como metales puros aunque por completo no lo sean. Sin embargo los metales puros tienen propiedades limitadas, las cuales se pueden mejorar y modificar mediante la aleación; la cual está compuesta por dos o más elementos químicos de los cuales al menos uno es un metal. La mayoría de los metales utilizados en aplicaciones de ingeniería son algún tipo de aleación, la cual consta de dos formas básicas: soluciones sólidas y compuestos intermetálicos. (KALPAKJIAN, 2008, pág. 115)

#### **Soluciones sólidas**

Dos términos son fundamentales para describir las aleaciones: soluto y solvente. El soluto es el elemento menor (como la sal o el azúcar) que se agrega al solvente, el cual es el elemento base (como el agua). En términos de los elementos comprendidos en la estructura cristalina, el soluto (compuesto por átomos de soluto) es el elemento que se agrega al solvente (compuesto por los átomos base). Cuando la estructura cristalina particular del solvente se mantiene durante la aleación, a ésta se le llama solución sólida. (KALPAKJIAN, 2008, pág. 116)

### **Soluciones sólidas intersticiales**

Si el tamaño del átomo de soluto es mucho menor que el del átomo solvente, entonces puede ocupar una posición intersticial; este proceso forma una solución sólida intersticial. Existen dos condiciones necesarias para formar soluciones intersticiales:

1. El átomo solvente debe tener más de una valencia.
2. El radio atómico del átomo de soluto debe ser menor que 59% del radio atómico del átomo solvente.

Si no se cumplen estas condiciones, puede producirse una solubilidad intersticial limitada, o no ocurrir.

Una familia importante de soluciones sólidas intersticiales es el acero, el cual es una aleación de hierro y carbono en donde los átomos de carbono se encuentran presentes en las posiciones intersticiales de los átomos del hierro. Por ejemplo, el radio atómico del carbono es 0.071 nm, que es menor al 59% del radio del hierro, el cual es 0.124 nm.

Las propiedades de los aceros al carbono pueden variar en una gama amplia, controlando la proporción de carbono y elementos aleantes en el hierro. (KALPAKJIAN, 2008, pág. 116).

Los metales forman diferentes estructuras cristalinas para minimizar la energía requerida para agruparse en un patrón regular. Por ejemplo, el tungsteno forma una estructura BCC porque ésta requiere menos energía que las otras; de manera similar, el aluminio forma una estructura FCC. Sin embargo, a diferentes temperaturas, el mismo metal puede formar diferentes estructuras debido a un requerimiento menor o mayor de energía, este cambio se denomina alotrópico. Por ejemplo, el hierro forma una estructura BCC (hierro alfa) debajo de 912 °C (1674 °F) y arriba de



1394 °C (2541 °F), pero forma una estructura FCC (hierro gama) entre 912 °C y 1394 °C.

(KALPAKJIAN, 2008, págs. 47-49).

### **Fase Austenítica**

El acero ASTM A 128 es de estructura Austenítica, este tipo de estructura comprende un ordenamiento diferente en los átomos hierro-carbono.

La Austenita (bautizada así en honor de W. R. Austen, 1843-1902) (KALPAKJIAN, 2008, pág. 122). es una solución sólida intersticial de carbono o carburo de hierro en hierro gama con patrón de ordenamiento FCC, puede contener de 0 a 1,7% de carbono y es por lo tanto un constituyente de composición variable; todos los aceros se encuentran formados por cristales de Austenita cuando se calientan a temperatura superior a las críticas ( $Ac_3$  o  $Ac_{cm}$ ). Aunque generalmente es un constituyente inestable, se puede obtener esa estructura a la temperatura ambiente por enfriamiento rápido de aceros de alto contenido en carbono o de muy alta aleación, como en este caso el acero Hadfield en donde la Austenita aparece a temperatura ambiente por simple enfriamiento al aire. (Barreiro, 2000, págs. 114-116)

Los efectos de los elementos de aleación en el diagrama de fases hierro-carburo de hierro consiste en que cambian la temperatura y la composición eutéctoides (porcentaje de carbono en el acero en el punto eutéctico); también se modifican otros límites de fase.

La temperatura eutéctica se puede elevar o reducir de 727 °C (1341 °F), lo que depende del elemento de aleación en particular. Por otro lado, los elementos de aleación siempre reducen la composición eutéctica (esto es, su contenido de carbono es menor que 0.77%). Reducir la

temperatura eutectoide significa aumentar la gama de la Austenita. El resultado es que al elemento de aleación (como el níquel) se le conoce como **formador de Austenita (elementos gamagénicos)**. El níquel tiene una estructura fcc, por lo que favorece la estructura fcc de la Austenita. En cambio, el cromo y el molibdeno poseen una estructura bcc que favorece la estructura bcc de la ferrita. A estos elementos se les conoce como **estabilizadores de ferrita o elementos alfaagénicos**. (KALPAKJIAN, 2008, pág. 124)

La Austenita en los aceros austeníticos de alta aleación se presenta formando cristales poliédricos parecidos a los de la ferrita pero se diferencia de estos por ser sus contornos más rectilíneos y los ángulos vivos.

Otra de sus características, es que la Austenita es poco magnética, blanda muy dúctil y tenaz, además presenta bastante resistencia al desgaste y se considera el constituyente más denso de los aceros; la ilustración 4 representa la estructura cristalina de los átomos de hierro en la Austenita de los aceros.

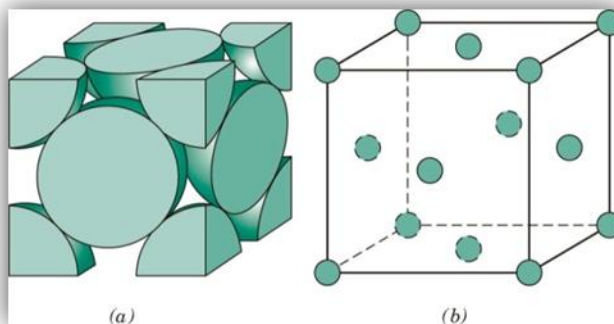


Ilustración 4. Estructura Cubica Centrada en las caras (FCC) (William D. Callister, 2001)

Una estructura Austenítica brinda propiedades fundamentales que caracterizan al acero Austenítico ASTM A 128 de los demás.

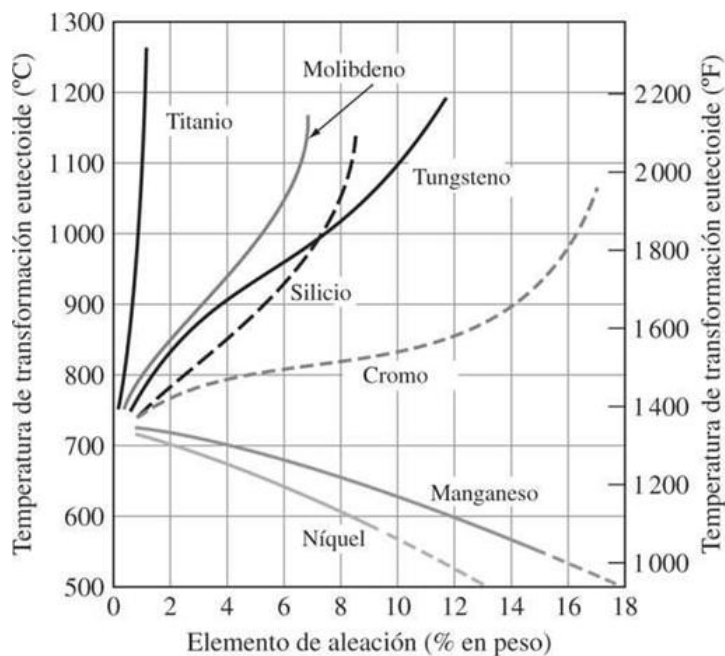


Ilustración 5. Diagrama de dependencia de la Temperatura Eutectoide en Aleaciones de elementos concentrados (callister, 2009)

El magnetismo es causado por la alineación en los giros de los electrones en la tercera capa de cada átomo. Cada átomo cuenta con un momento dipolar magnético y en materiales ferromagnéticos las zonas de átomos con momentos similares tienden a formarse a lo largo del objeto. Así, cuando un imán se aproxima al material ferromagnético las zonas que están alineadas con el campo crecen y las que no lo están disminuyen, este cambio produce una red o malla en la estructura del acero la cual hace que ésta, sea atraída por el imán. (Materials Science and Engineering, Advanced Refractory Technologies. Art 3B, 2009)

Los aceros austeníticos al manganeso ASTM A 128 se pueden presentar de diferentes tipos de acuerdo al contenido de los elementos aleantes presentes en su composición química, la tabla 1 muestra la composición química típica de estos aceros.

Tabla 1 Rangos de composición estándar para fundiciones de aceros austeníticos al manganeso (ASM Handbook Vol 1, Properties and Selection: Irons, steels and High Performance Alloys. p1274., 2005)

ASTM A 128 Grado	% de composición						
	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si (máx.)	P (máx.)
A	1.05–1.35	11.0 min	...	...	...	1.00	0.07
B-1	0.9–1.05	11.5–14.0	...	...	...	1.00	0.07
B-2	1.05–1.2	11.5–14.0	...	...	...	1.00	0.07
B-3	1.12–1.28	11.5–14.0	...	...	...	1.00	0.07
B-4	1.2–1.35	11.5–14.0	...	...	...	1.00	0.07
C	1.05–1.35	11.5–14.0	1.5–2.5	...	...	1.00	0.07
D	0.7–1.3	11.5–14.0	...	...	3.0–4.0	1.00	0.07
E-1	0.7–1.3	11.5–14.0	...	0.9–1.2	...	1.00	0.07
E-2	1.05–1.45	11.5–14.0	...	1.8–2.1	...	1.00	0.07
F	1.05–1.35	6.0–8.0	...	0.9–1.2	...	1.00	0.07

Por lo tanto, a cada grado de Acero Austenítico se le asigna una composición química distinta, en donde los microconstituyentes pueden variar; lo que se ve directamente reflejado en sus propiedades mecánicas, además otro factor que modifica las propiedades mecánicas del acero y su microestructura es el tratamiento térmico, el espesor de las piezas a fabricar y los procesos de conformado en frío.

Es por esto que para el tratamiento térmico de las probetas y determinar las temperaturas aproximadas, se ha consultado el ASTM para aceros austeníticos adicional a los artículos en donde se han ejecutado investigaciones similares referentes a aceros austeníticos ASTM A128.

## ANTECEDENTES

Los aceros Hadfield normalmente presentan buen endurecimiento por deformación, característica que puede endurecer el material demasiado al final de su vida útil, Khrushchov y Richardson quienes investigaron un poco más el endurecimiento por deformación notaron un incremento de dureza en los metales endurecidos por trabajo y además observaron que hay pequeños efectos en la resistencia al desgaste lo cual hace que se forme una capa superficial que se puede formar antes de poner al material en trabajo y dependiendo del tamaño de grano que presente la microestructura puede endurecerse por granallado antes de poner el material en operación lo cual influye positivamente en la dureza. La temperatura de austenización para las probetas que luego fueron sometidas a granallado fue 1050 ° C. (Weilin Yan, 2007)

En los aceros Hadfield Para disolver los carburos en su totalidad se requiere una temperatura de tratamiento de la solución que sobrepase la línea  $A_{cm}$  aproximadamente 30 a 50 ° C (50 a 90 ° F). Aunque podría parecer que temperaturas superiores a 1095 ° C (2000 ° F) permitirían el uso de cantidades de carbono entre 1,4 a 1,5% C, pero hay tres factores que limitan el uso de temperaturas muy altas:

1. La fusión incipiente se produce en áreas de segregación de carbono y fósforo
2. El escalamiento y la descarburación se hacen excesivos
3. Las tasas de enfriamiento comercial son limitadas en su capacidad para retener altas concentraciones de carbono en solución

El tratamiento térmico convencional del acero ASTM A 128 se hace con un calentamiento lento, entre 1010 y 1090 °C y normalmente un tiempo de permanencia de 1 a 2 horas por cada pulgada de espesor, esto asegura la homogeneidad de la fase Austenítica. (ASM Handbook Vol 1, Properties and Selection: Irons, steels and High Performance Alloys. p1274., 2005, p. 1286)

La solución de temple idealmente debe ser agitada, esto influye en el tamaño de grano debido a que es más rápida la tasa de transferencia de calor, cambiando la velocidad de solidificación lo cual repercute directamente en el tamaño de grano.

El calentamiento durante el tratamiento térmico en los aceros Hadfield debe ser realizado lentamente para prevenir grietas internas o grietas por propagación y la temperatura de austenización influye en el contenido de carburos en los límites de grano en el tratamiento térmico de temple en los aceros ASTM A128 una temperatura ideal según Sh. Hosseini and M. B. Limooei según estudio realizado indico que la temperatura de 1150°C y concentración de sal ideal en el medio de enfriamiento de 3% llegan a disminuir carburos en los límites de grano (Limooei S. H., 2014).

Para el temple en general se usan factores principales como la temperatura, tiempo de permanencia según espesor de la pieza a tratar y la velocidad de enfriamiento que pueda presentarse por medio de la solución.

Los aceros Hadfield también son estrictamente sensibles al espesor de sección debido a la baja conductividad térmica por lo que en secciones gruesas, los carburos se precipitan como

transgranulares<sup>2</sup> y límites de grano lo que consecuentemente resulta en la reducción de la propiedades mecánicas (Limooei S. H., 2011), por lo cual en todas las piezas no se presenta un perfil de dureza homogéneo.

Para obtener una deseable tenacidad, la microestructura de los aceros Hadfield debe ser completamente Austenítica y el tratamiento térmico es probablemente el resultado de la tenacidad en esta aleación, por lo tanto la temperatura de la solución debe ser alta para disolver los carburos dentro de la Austenita. (Limooei S. H., 2011)

### **Aceros al manganeso modificados**

Estudios que modifican la composición química del acero Hadfield tradicional muestran que altos contenidos de vanadio (con contenidos de vanadio cercanos al 10 %pe) forman carburo de vanadio y no tienden a formar  $(Fe, Mn)_3C$  ya que el Vanadio tiene mayor afinidad química con el carbono que el Fe y el Mn; el carburo de vanadio (CV). En la microestructura del acero, los carburos no se encuentran localizados en los límites de grano de la Austenita sino como fases dispersas en una matriz Austenítica pero el que se presenta en mayor proporción es el CV y en cantidades menores el  $(Fe, Mn)_3C$  como se observa en la ilustración 6. (Moghaddam, Varahram, & Davami, 2011)

---

<sup>2</sup> En los metales policristalinos, las trayectorias de fractura que más se observan son transgranulares (transcristalinas o intragranulares); esto es, la grieta se propaga a través del grano. (KALPAKJIAN, 2008, pág. 92)

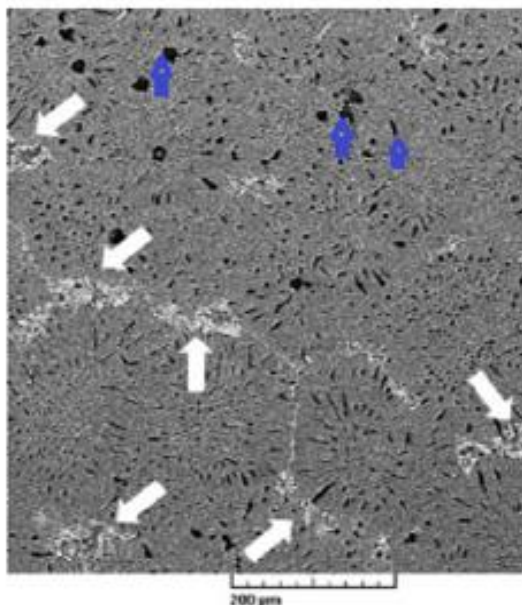


Ilustración 6. Microestructura del acero austenítico con 10,04 % wt de vanadio, muestra una matriz Austenítica con un precipitado oscuro de carburos de vanadio (flechas azules) y un precipitado claro en menor proporción de  $(Fe, Mn)_3C$  (flechas blancas). Tomada de SEM a 200X (Moghaddam, Varahram, & Davami, 2011)

A medida que el contenido de carbono aumenta la cantidad de carburo de vanadio también se incrementa y el carburo de vanadio cambia de estar en forma laminar a forma esférica en la microestructura; esto se observa cuando el porcentaje de carbono cambia del 2 % C al 3% C (Moghaddam, Varahram, & Davami, 2011); favoreciendo el endurecimiento por dispersión ideal que mejora la dureza y tenacidad del acero al presentar en el material la fase dispersa en pequeños tamaños y de forma esférica. Pero contenidos de carbono superiores al 3 % como es el caso mostrado en la ilustración 7d con 3,3 % C no presentan un endurecimiento por dispersión ideal porque la fase dispersa tiende a ser laminar. La ilustración 7 muestra la fase dispersa del carburo de vanadio relacionada con el contenido de carbono (Moghaddam, Varahram, & Davami, 2011).



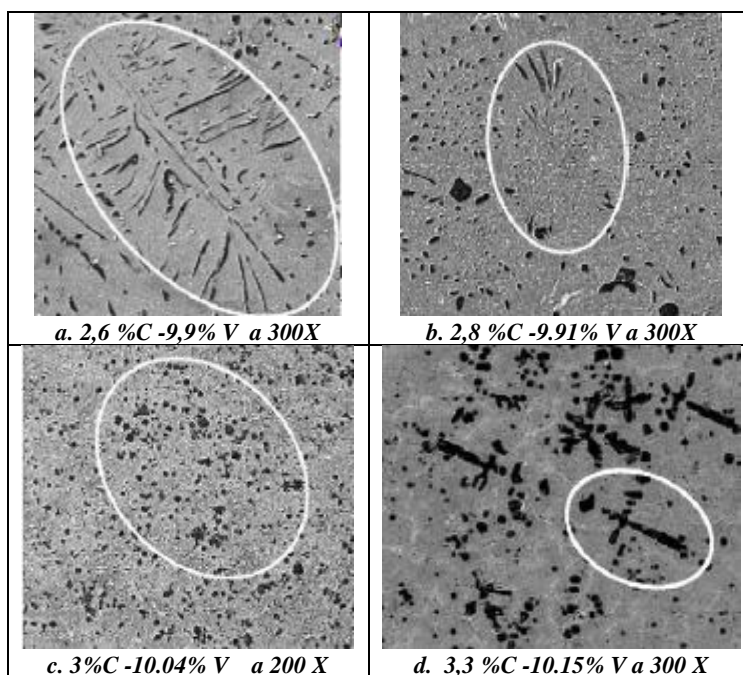


Ilustración 7. Microestructuras del acero austenítico en condición de fundido con alto porcentaje de vanadio y diferentes porcentajes de Carbono en su composición. La matriz corresponde a la Austenita y las áreas oscuras el carburo de vanadio precipitado. Tomado del SEM (Moghaddam, Varahram, & Davami, 2011)

La microestructura del acero con contenidos de vanadio cercanos al 10 %pe muestra que antes y después del tratamiento térmico de temple en agua con una temperatura de temple de 1100 °C sostenida por 90 minutos no tiene un cambio notorio en la distribución y morfología de los carburos como se muestra en la ilustración 8.

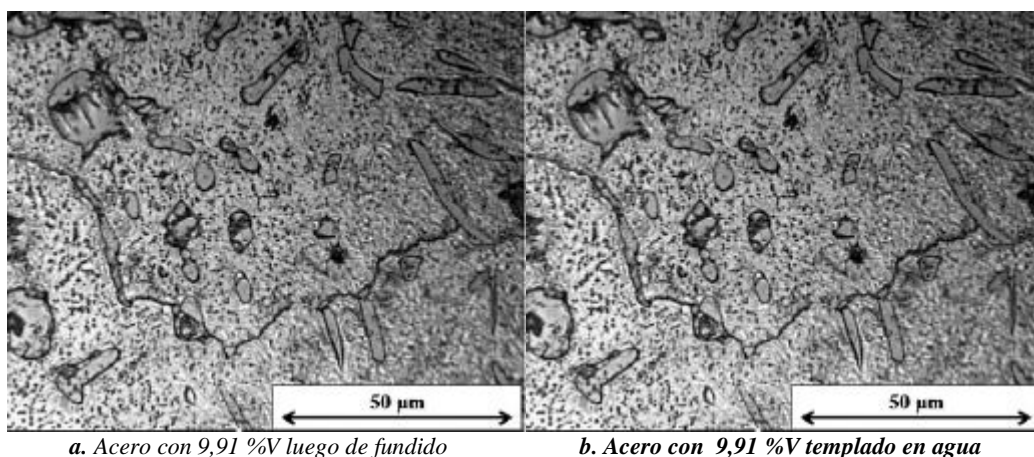


Ilustración 8. Acero con 9,91 %V, antes y después de tratamiento térmico de temple. Microestructura tomada con microscopía óptica. Matriz de Austenita y precipitado de carburos de vanadio (**Moghaddam, Varahram, & Davami, 2011**)

La ilustración 9 muestra la tenacidad de los aceros austeníticos con diferentes proporciones de carbono y vanadio y el acero Hadfield antes y después de realizar el tratamiento térmico (T.T.) de temple. Se observa entonces que el mayor valor de tenacidad luego de T.T. y en el que notablemente se ve una gran diferencia en dicha propiedad antes y después de T.T., es el acero Hadfield. (Moghaddam, Varahram, & Davami, 2011); este comportamiento beneficioso se debe a que durante el tratamiento térmico de temple los carburos que se encontraban en los límites de grano de la Austenita se disuelven en la matriz de Austenita quedando la microestructura formada en su mayoría por granos de Austenita, como se muestra en la ilustración 1b, con lo cual se logra una mayor tenacidad en el acero; en cuanto a los aceros que están modificados con vanadio se observa que el que presenta mayor tenacidad es el que tiene 10,4%V y 3%C y se puede observar en la ilustración 6 en donde los carburos de vanadio están dispersos con morfología de pequeñas partículas circulares; siendo esta la morfología más cercana a lo ideal en el endurecimiento por dispersión lo que da como resultado también una mejora en la tenacidad del material.

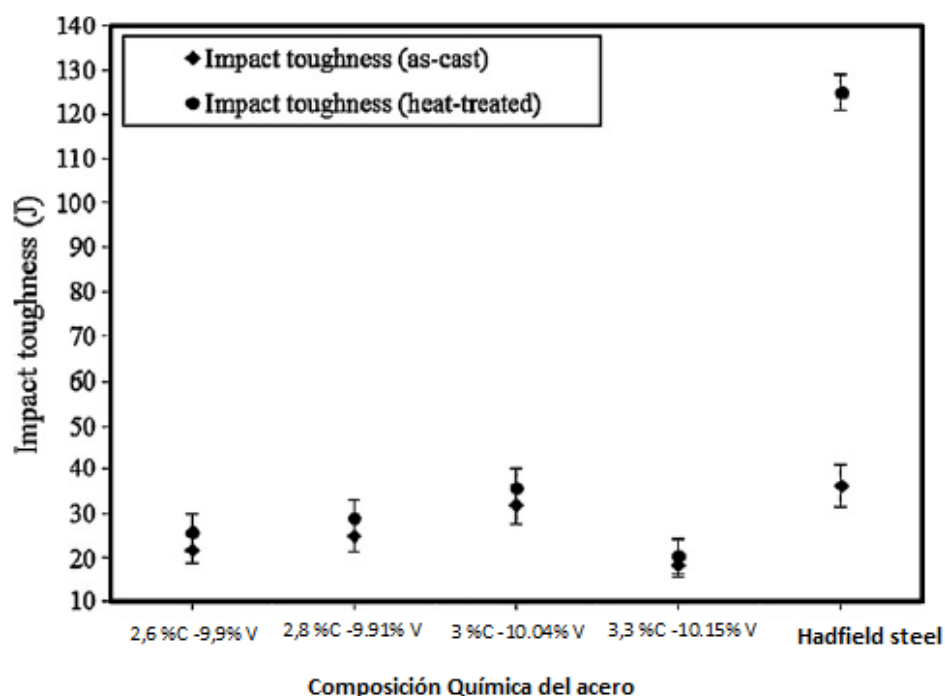


Ilustración 9 Tenacidad al impacto de los aceros de acuerdo a su composición química (Moghaddam, Varahram, & Davami, 2011)

### Acero modificado con Cromo

En el estudio realizado por Tianfu y Fucheng (Tianfu & Fucheng, 1997) se comparó el comportamiento al endurecimiento por deformación y la resistencia al desgaste abrasivo del acero Hadfield y otro acero con la mitad de manganeso, las composiciones químicas de los dos aceros estudiados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Composición química del acero Hadfield y el acero al manganeso modificado (Tianfu & Fucheng, 1997)

Tipo de Acero	C	Mn	Cr	Si	S	P
6 Mn – 2 Cr	1,1	6	3	0,6	0,01	0,02
Hadfield	1,1	13		0,5	0,02	0,04

Los resultados indicaron que el acero 6Mn-2Cr presentó un 20 % más de resistencia al desgaste abrasivo que el acero Hadfield, luego de someterse a condiciones de energía de

impacto, sin embargo se presentó disminución en la resistencia al desgaste del acero 6Mn-2Cr con el aumento de energía de impacto.

La energía absorbida fue de 5 KJ/m<sup>2</sup> en un primer ensayo y de 10 KJ/m<sup>2</sup> en un segundo ensayo para ambas aleaciones. (Tianfu & Fucheng, 1997).

Por lo tanto, la resistencia al desgaste del acero 6Mn-2Cr es más alta que la del acero Hadfield en condiciones de baja energía de impacto, ya que se crean numerosos listones de martensita debido a la deformaciones y dislocaciones. Se cree entonces que los esfuerzos de tensión superficial, son causados por el efecto expansivo de los listones de martensita.

Ahora, bajo la condición de un desgaste de energía de impacto más alto (10 KJ / m<sup>2</sup> hay martensitas profusas inducidas por deformación en la capa superficial del acero 6Mn-2Cr y la fragilidad de la capa endurecida por el trabajo aumenta, la fuerza de impacto es lo suficientemente grande como para que las astillas frágiles se despeguen lo cual conduce a una caída de la resistencia al desgaste en el acero 6Mn-2Cr. Mientras en el acero Hadfield Bajo las mismas condiciones, la fuerza de impacto permite una completa capacidad de endurecimiento por trabajo y la resistencia al desgaste tiende a aumentar.

### **Marco Legal**

El acero Austenítico ASTM A 128, se estudió bajo la norma correspondiente del ASTM, lo publicado en metal Handbook vol. 1, los artículos que se citan en las referencias y bajo las condiciones de industrias magma de no revelar información detallada del proceso de fabricación que se ejecuta en dicha empresa, por este motivo en este trabajo de grado no se viola los derechos de fabricación y se respeta la custodia de los secretos empresariales, brindando la posibilidad de proporcionar a la empresa una alternativa de mejora en el proceso de tratamiento térmico del acero, de acuerdo a sus requerimientos

## CAPITULO 2

### Proceso de fundición del acero ASTM A128 en Industrias Magma

#### Fundición del Acero

La figura muestra parte del proceso de vertido del acero en fase líquida hacia la cuchara de fundición en Industrias Magma



Ilustración 10 Acero vertido del horno a la cuchara Fuente: Industrias Magma

El proceso de fundición de este acero comienza con la recolección y selección de la materia prima la cual se compone de material recirculante es decir (chatarra) de aceros Hadfield, hierro gris y demás chatarra reunida, cabe aclarar que la chatarra es previamente pesada y seleccionada antes de ser fraccionada y llevada al horno de inducción eléctrico, en donde circulan corrientes de Foucault alrededor de este material con lo cual este, se calienta debido a dichas corrientes. Los devanados son generalmente en cobre.

Una vez la materia prima alcanza el punto de fusión “1470°C - 1500 °C” el Ingeniero jefe de producción es el encargado de dirigir el proceso para estabilizar estequiometricamente la carga del horno.

Antes de realizar el proceso de vaciado de la colada se realiza el análisis químico a una muestra, este análisis es cuantitativo y se realiza con la técnica de espectrometría de emisión óptica o de chispa. La espectrometría es realizada con un espectrómetro, Shimadzu PDA 7000<sup>3</sup>, dentro del proceso de caracterización este paso es esencial debido a que marca las pautas para un buen inicio en la fabricación y caracterización del acero.

### **Proceso de vaciado**

Una vez es verificado que la composición química del metal fundido es la correcta, esta es vaciada en los moldes de arena preparados de acuerdo a los requerimientos. Para el desarrollo de este proyecto se ha hecho recolección de probetas de acero Hadfield con molibdeno y acero Hadfield sin molibdeno, estas probetas fueron tomadas aleatoriamente



Ilustración 11 Proceso de vaciado del horno a una temperatura aproximada de 1400°C Fuente: Industrias Magma

<sup>3</sup> Espectrómetro de emisión óptica de alto rendimiento, utiliza el método PDA como método estándar.

Nota: Método PDA, ver glosario.

El proceso de vaciado aunque aparentemente no presenta mayores complicaciones es fundamental para continuar el aseguramiento de la calidad del acero. En este proceso factores como la velocidad de vaciado, la cantidad de material por molde, la temperatura y acabado de los moldes son factores que determinan la presencia o ausencia de burbujas de aire, arrastre de arena, acabado superficial, lágrimas calientes y porosidad. Dichos factores pueden determinar la calidad del material.

El acero Hadfield fundido es sometido a tratamiento térmico de temple, el cual eleva la dureza y la tenacidad, y en algunos casos el revenido el cual alivia tensiones internas. La información compartida por la compañía de Aceros Magma nos dice que la temperatura de las piezas se encuentra alrededor de T1 y T2 y el tiempo de permanencia está directamente relacionado con el espesor y volumen de la pieza a tratar.

## CAPITULO 3

### Proceso Experimental “Factores Relevantes Tratamiento Térmico”

#### Temperatura aproximada

Para este material según metals handbook (ASM Handbook Vol 1, Properties and Selection: Irons, steels and High Performance Alloys. p1274., 2005) y promedios de temperatura en la literatura encontrada, se recomienda realizar el temple entre 1000 y 1100 °C.

Los parámetros de temperatura se manejaron en ciertos rangos debido a que los diagramas de fase nos mencionaban ciertos valores aproximados que se consideraron afectarían obtener una mejor microestructura, por ende la temperatura más baja de 1000 °C fue descartada debido a que no se alcanzaría una total austenización debido a los elementos aleantes de este acero, de la misma manera, no se alcanzó ni llegó a exceder T<sub>1</sub> °C debido a que se cree que esto influye directamente en el tamaño de grano y en algunos casos podría presentarse descarburización.

#### Tiempo de Permanencia

Los aceros austeníticos son estrictamente sensibles al espesor de sección, debido a la relativamente baja conductividad de calor, lo cual ocasiona reducción de las propiedades mecánicas.

Para este estudio se empleó 60 minutos para un espesor de 1 in de sección transversal, tomando como base lo que se recomienda en el Metals Handbook Vol. 1 para aceros austeníticos (ASM Handbook Vol 1, Properties and Selection: Irons, steels and High Performance Alloys. p1274., 2005).



### **Medios de enfriamiento “Solución salina”**

Los siguientes son los medios de enfriamiento que se utilizaron para enfriar el acero después de que este estuvo en tiempo de permanencia durante la austenización. Se resalta que el uso de la solución salina, actúa como un electrolito que deja iones de sodio positivos y iones de cloro negativos, estos su vez actúan como elemento de transmisión de energía “calor”. De la misma manera se cree que esta solución salina elimina la capa de vapor que se genera durante el choque térmico de la pieza a templar con el medio enfriamiento.

- ✓  $H_2O$  “Agua”
- ✓  $H_2O + NaCl$  0,6%pe “Agua + Cloruro de sodio con concentración de 0,6% pe NaCl”
- ✓  $H_2O + NaCl$  a 1,2%pe “Agua + Cloruro de sodio con concentración de 1,2% pe NaCl”
- ✓  $H_2O + NaCl$  a 1,8 %pe “Agua + Cloruro de sodio con concentración de 1,8% pe NaCl
- ✓  $H_2O + NaCl$  a 2,4%pe “Agua + Cloruro de sodio con concentración de 2,4% pe NaCl”
- ✓  $H_2O + NaCl$  a 3,0 %pe “Agua + Cloruro de sodio con concentración de 3,0% pe NaCl”

### **Diseño de experimental**

El acero ASTM A 128 fue suministrado por Industrias Magma y se utilizaron dos tipos de Acero Hadfield, uno con presencia de Molibdeno como elemento aleante y el otro con ausencia de este.

Este acero se analizó químicamente por medio de la técnica de espectroscopía de emisión óptica (espectroscopía de chispa) elaborada en industrias Magma.

Los dos tipos de acero fueron sometidos a tratamiento térmico de temple, manteniendo constante la temperatura de temple y su tiempo de permanencia fue dado según el espesor de las probetas. Se fue modificando el medio de enfriamiento en cuanto a la concentración de solución salina para verificar si la disipación de calor era mayor; por lo tanto el diseño de experimentos es de tipo factorial y es mostrado en la tabla 3. Las concentraciones de NaCl se realizaron de acuerdo a lo recomendado en otras investigaciones (Limooei S. H., 2014).

**Tabla 3. Diseño de experimentos tipo factorial** Fuente: los autores

Factores	Niveles
Medio de enfriamiento	Agua
	Agua + 0,6 %pe NaCl
	Agua + 1,2 %pe NaCl
	Agua + 1,8 %pe NaCl
	Agua + 2,4 %pe NaCl
	Agua + 3 %pe NaCl
Temperatura de temple	Una temperatura
Tiempo de permanencia de temple	Un tiempo

De acuerdo a la tabla 3 el número de combinaciones de tratamiento térmico fueron 6.

### **Caracterización del acero templado**

La caracterización realizada incluye los perfiles de dureza y análisis de las microestructuras, de acuerdo al diseño de experimentos mostrado en la tabla 4.

Tabla 4. Diseño de experimentos para la caracterización del acero templado  
Fuente: los autores

Factores	Niveles
Acero T.T.	Acero sin Molibdeno sin tratar térmicamente
	Acero sin Molibdeno templado en agua
	Acero sin Molibdeno templado con 0,6%pe NaCl en solución
	Acero sin Molibdeno tratado con 1,2%pe NaCl en solución
	Acero sin Molibdeno tratado con 1,8 %pe NaCl en solución
	Acero sin Molibdeno tratado con 2,4%pe NaCl en solución
	Acero sin Molibdeno tratado con 3%pe NaCl en solución
	Acero con Molibdeno tratado térmicamente a la temperatura de Magma
	Acero con Molibdeno tratado térmicamente a la temperatura propuesta
Perfil de dureza	Se tomaron 4 réplicas para cada toma de dureza “Perfiles de dureza 32”
Análisis microestructural por microscopía óptica	Se realizaron los análisis microestructurales a las probetas tratadas

### Ejecución parte experimental

Las probetas fueron llevadas a temperatura de austenización en una mufla marca Abarephor de 220 V, 1650 W y temperatura máxima de 1250 °C, con tiempos de permanencia de 40 °C por encima de temperatura crítica superior lo que equivale T1-60°C en nuestro proceso experimental de acero sin molibdeno y de T1 temperatura media utilizada por industrias magma para la fabricación de su material acero con molibdeno.

Las cubetas que se utilizaron para el medio de enfriamiento presentan un volumen de 45 litros de agua. El peso de NaCl se hizo en balanza digital modelo traveler TA3001 marca

OHAUS Corporation y fue medido utilizando como base el volumen de agua presente en la cubeta para cada probeta individualmente según concentración de NaCl determinada en el proceso experimental. Las probetas que no precisaron NaCl fueron enfriadas en agua, sin concentración alguna de agentes químicos externos.

El lijado de las probetas fue hecho en las lijadoras manuales marco Deco Modelo DS20 pasando desde las lijas gruesas como 80 e intermedias como 400 hasta llegar a 1000 y luego la aplicación de la alúmina se hizo en la pulidora de paño marca Buehler modelo Metaserv 250 utilizando una solución de alúmina de 0,3 micrones mezclado con agua.

Los perfiles de dureza fueron tomados con un durómetro manual PTC. Modelo 316 con escala de dureza equivalente en Rockwell C. Este equipo pertenece al Laboratorio de materiales de la Universidad ECCI.

Nuevamente se hace pulido a paño para ejecutar el ataque químico y se utiliza Nital como reactivo el cual es usado para aleaciones ferrosas, cabe resaltar que no se usó Picral debido a que este se usa en aceros de baja aleación.

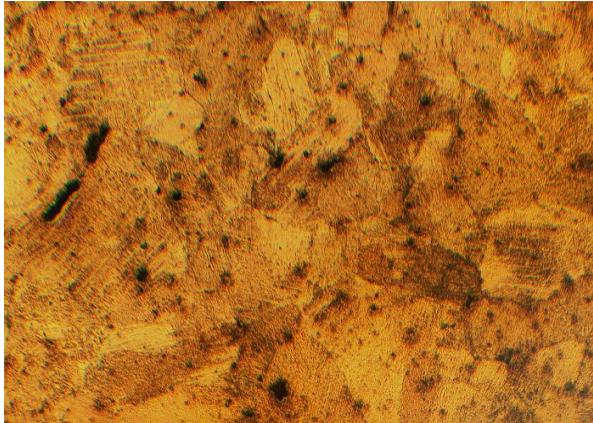
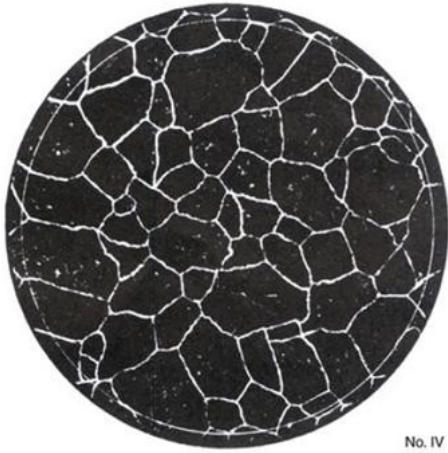
La microestructura se caracterizó por microscopía óptica en el microscopio “Unión Versamet” con software Stream Basic y cámara Olympus, este equipo pertenece al laboratorio de materiales de la universidad ECCI.

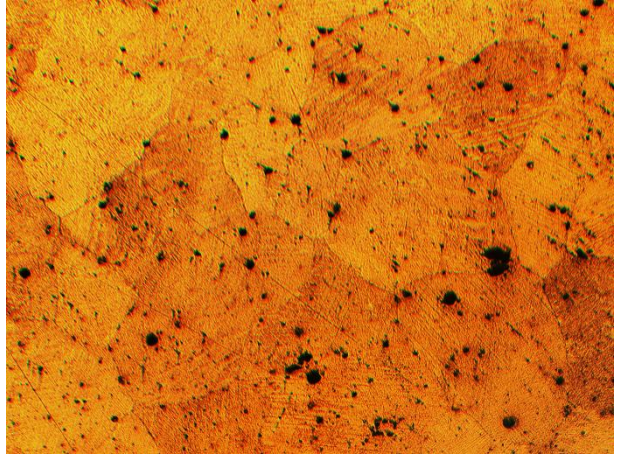
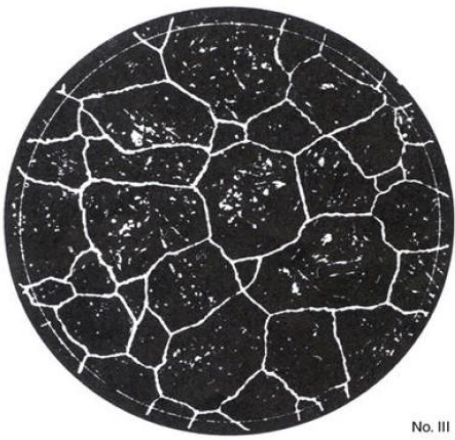
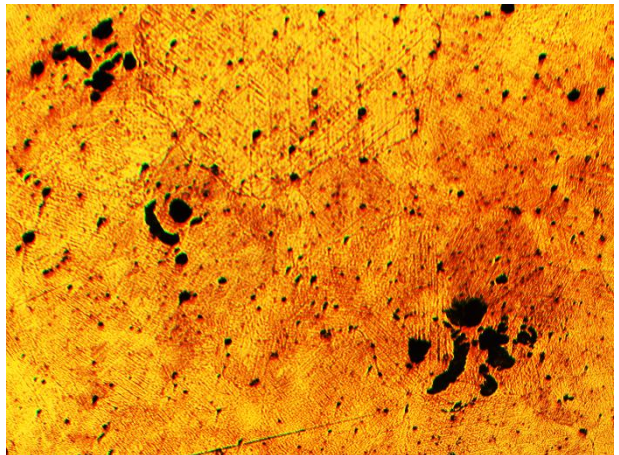

## CAPITULO 4

### Resultados obtenidos y análisis de resultados

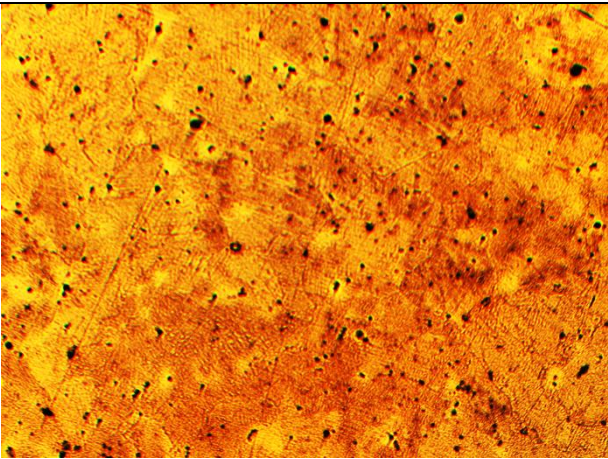

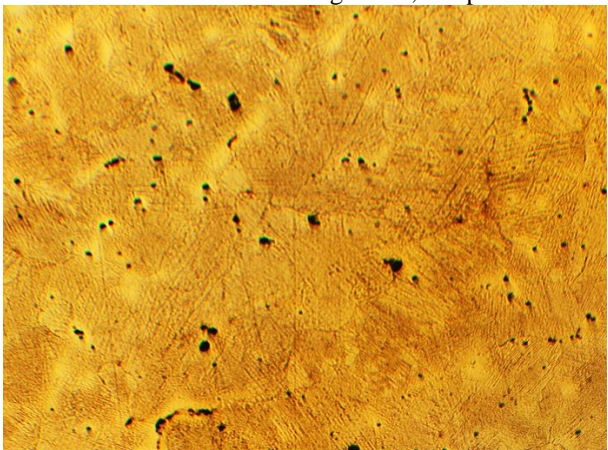
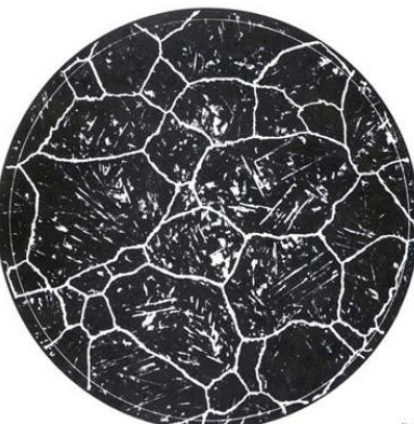
Las tabla 5 muestra las microestructuras a 100 X correspondientes a los resultados de las probetas de los diferentes tratamientos Térmicos (T.T.); en esta tabla se muestra la caracterización en cuanto al tamaño de grano de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana NTC 1174 “tamaño de grano Aceros” la cual es homologa a la norma internacional ASTM E112 “standard test methods for determining average grain size” (ICONTEC, 2002)

Tabla 5. Tamaño de grano a 100X probetas a diferentes medios de enfriamiento y temperatura. Fuente: Los Autores

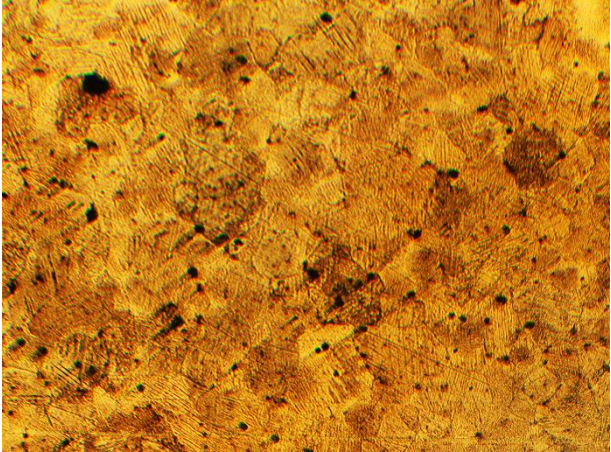
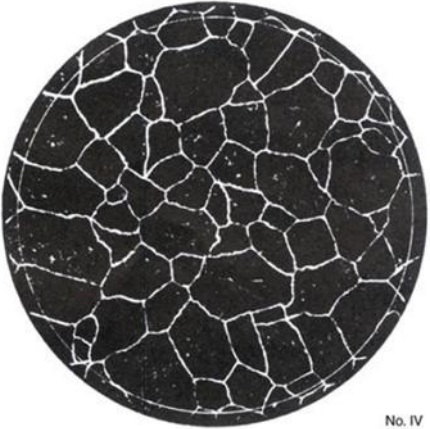
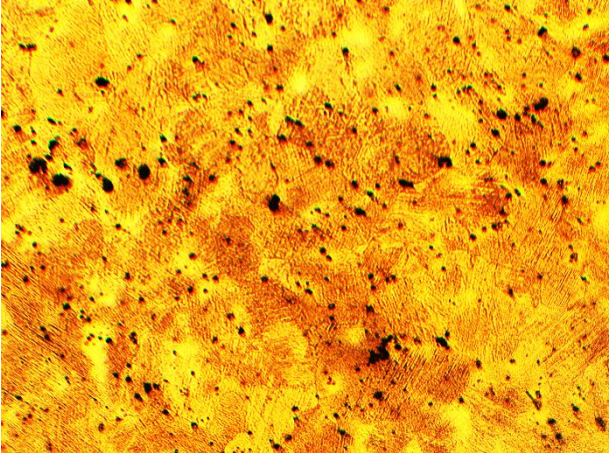
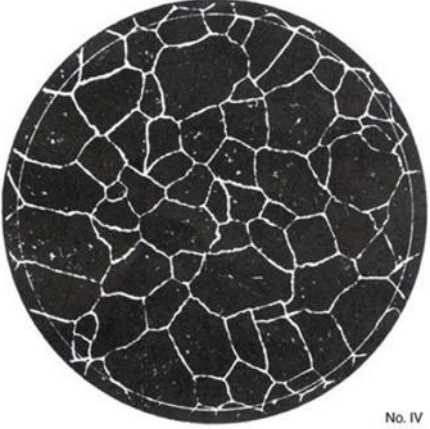
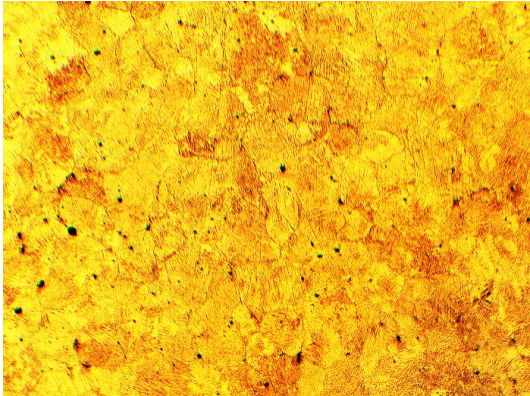
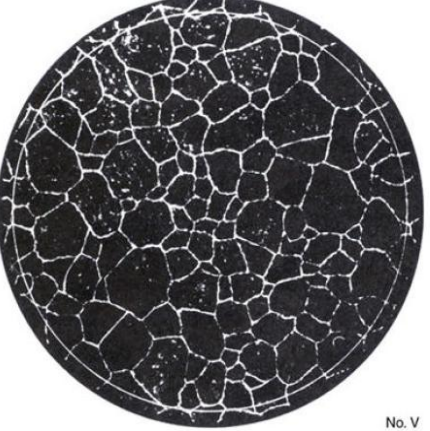
NTC 1174 100X para aceros Austeníticos	
<p>P1 Acero con Molibdeno T.T. a T1 °C Industrias</p> <p>magma</p> <p>Medio de Enfriamiento Agua</p> 	<p>Tamaño de grano N° 4</p> 
<p>P2 Acero con Molibdeno T.T. a T1- 60 °C</p> <p>Medio de Enfriamiento Agua</p>	<p>Tamaño de grano N° 3</p>

	 <p>No. III</p>
<p>P3 Acero sin Molibdeno T.T. a T1- 60 °C</p> <p>Medio de Enfriamiento Agua</p> 	<p>Tamaño de grano N° 1</p>  <p>No. I</p>
<p>P4 Acero sin Molibdeno T.T. a T1 - 60 °C</p> <p>Medio de Enfriamiento Agua + 0,6 % pe NaCl</p>	<p>Tamaño de grano N° 1</p>



	
<p>P5 Acero sin Molibdeno T.T. a T1 - 60 °C Medio de Enfriamiento Agua + 1,2 % pe NaCl</p> 	<p>Tamaño de grano N° 1</p> 
<p>P6 Acero sin Molibdeno T.T. a T1 - 60 °C Medio de Enfriamiento Agua + 1,8 % pe NaCl</p>	<p>Tamaño de grano N°4</p>

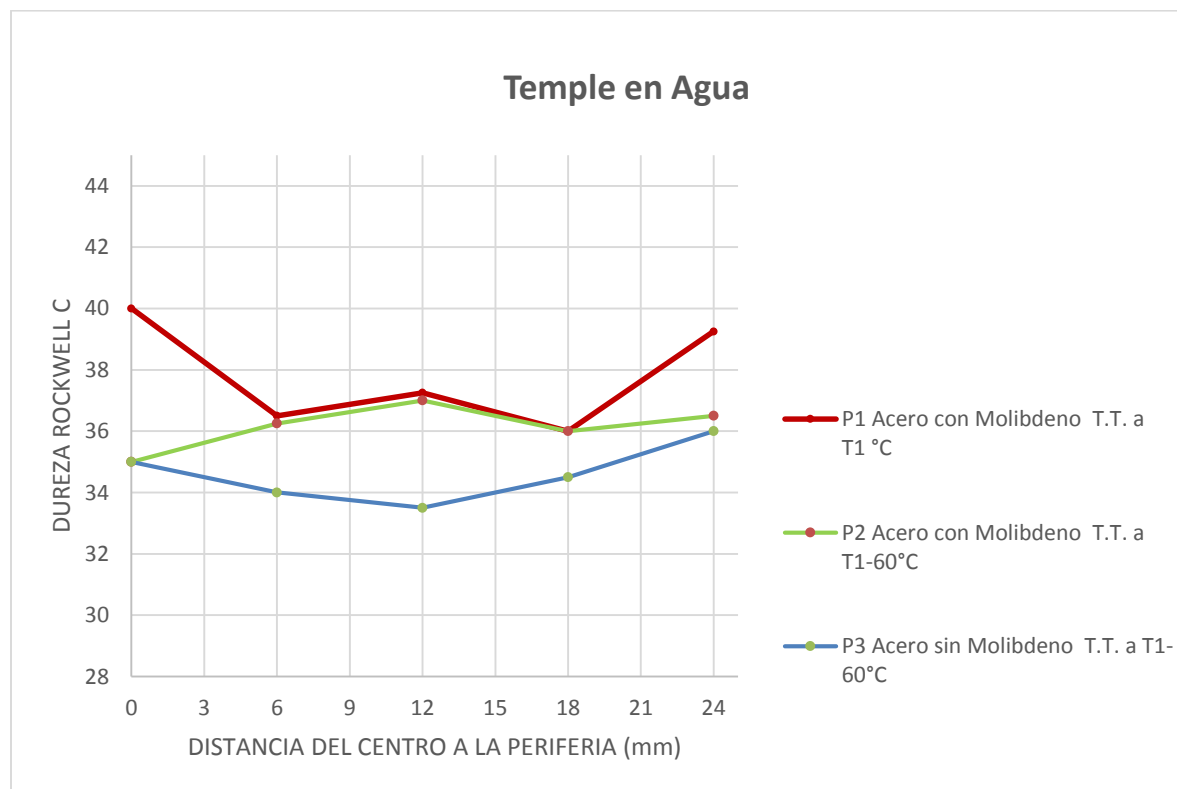


	 <p>No. IV</p>
<p>P7 Acero sin Molibdeno T.T. a T1 - 60 °C</p> <p>Medio de Enfriamiento Agua + 2,4 % pe NaCl</p> 	<p>Tamaño de grano N°4</p>  <p>No. IV</p>
<p>P8 Acero sin Molibdeno T.T. a T1 - 60 °C</p> <p>Medio de Enfriamiento Agua + 3,0 % pe NaCl</p> 	<p>Tamaño de grano N° 5</p>  <p>No. V</p>



Basados en las distintas concentraciones de NaCl, el tamaño de grano más fino fue observado en la probeta N° 8 tratada con una concentración de 3% de NaCl tal y como la imagen de dicha probeta lo indica en la tabla 5.

Adicionalmente se muestran los perfiles de dureza de todas las probetas con T.T. para hacer una comparación de la concentración, que finalmente podría emplearse en industrias magma de manera experimental en la producción de sus martillos con acero austenítico al manganeso. La grafica 1 indica el perfil de los promedios de dureza de las probetas T.T. en agua como medio de enfriamiento.

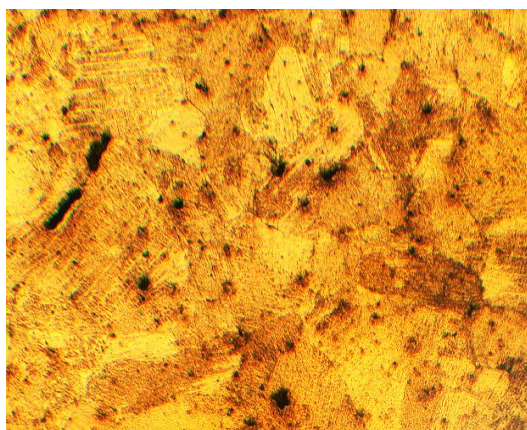


Grafica 1 resultados de dureza probetas TT con agua.

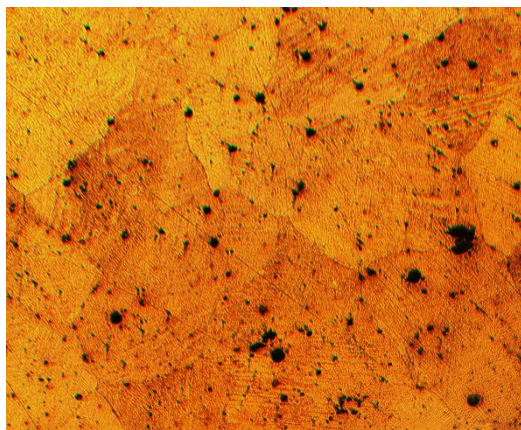
Fuente: Los Autores

Comparando los perfiles de dureza del acero con molibdeno que utilizaron las temperaturas de tratamiento térmico T1 y T1-60°C enfriados en agua de la gráfica 1, se puede evidenciar que aunque el valor de dureza de la periferia en el acero que utilizó T1 como temperatura, muestra un valor mayor, el perfil de dureza que presenta la mayor homogeneidad corresponde al tratamiento que utilizó T1-60°C es decir la menor temperatura, esto puede ser atribuido a un mejor comportamiento en cuanto al endurecimiento por dispersión, ya que se presentan las siguientes condiciones en la microestructura:

De acuerdo a las microestructuras de la ilustración 12 (a y b), en la figura b (tratamiento térmico a T1-60°C) existen menor presencia de carburos en el límite de grano, además de carburos con menor tamaño y dispersos en la matriz, que los que se observan en la microestructura a T.T. a T1 °C, por lo tanto estas condiciones podrían favorecer el endurecimiento por dispersión y posiblemente incrementar la tenacidad del acero, lo que puede ser la causa de la mayor homogeneidad en el perfil de dureza.



a. T1 a 100X



b. T1- 60°C a 100X

Ilustración 12 perfiles de dureza del acero con molibdeno a las temperaturas T1 y T1-60°C enfriados en agua  
Fuente: Los Autores

La gráfica 1 también evidencia que el tratamiento realizado en el acero sin Mo presentó los menores valores de dureza en todo el perfil debido al endurecimiento por solución sólida logrado en el acero con Mo por la presencia del Mo como elemento aleante, el análisis químico del acero Hadfield con y sin Mo se muestra en la tabla 6.

Tabla 6 comparación análisis químico probetas con Mo, sin Mo contra Norma ASTM A128

composición química Industrias Magma, Probetas TT			
Elemento	norma ASTM A128	probeta con Mo	probetas sin Mo
C	1,05-1,45	1,242	1,214
Mn	11,5 - 14,0	12,87	13,46
P	0,07 Max	0,0356	0,391
S	-	0,0112	0,112
Si	1,00 Max	0,5065	0,4075
Cr	-	1,972	1,437
Ni	-	0,1596	0,456
Cu	-	0,001	0,0342
Mo	-	0,2972	0,0499
Al	-	0,1458	0,0638
Base		82,765	83,238

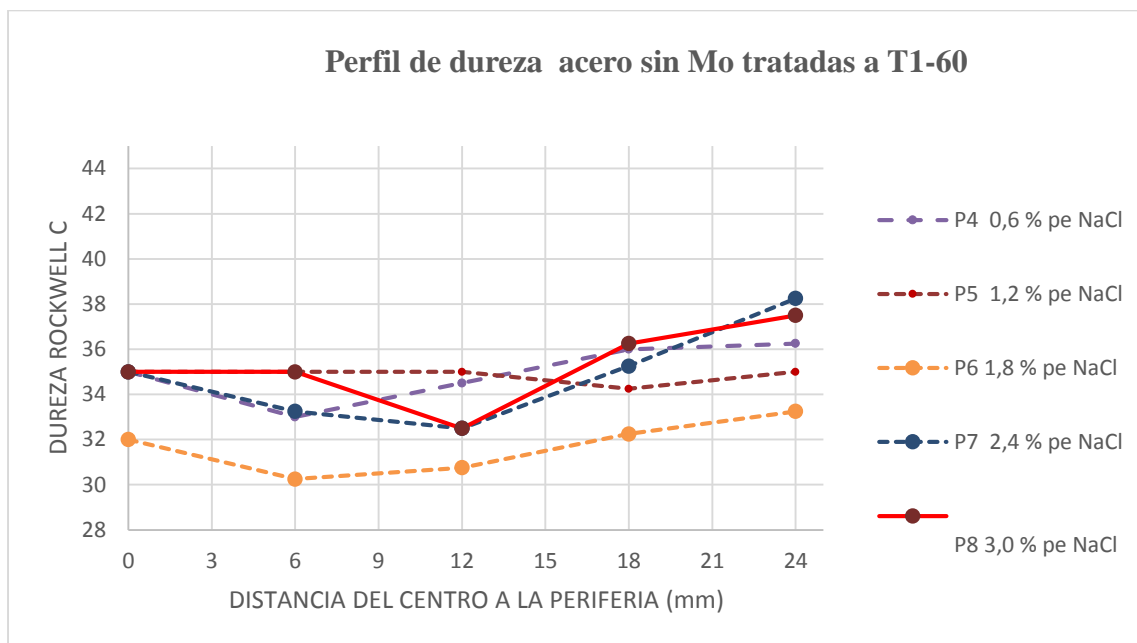
Ver. Tabla 1 Análisis Químico ASTM A 128

Ver Anexo 1: Resultados Análisis Espectrometría a Probetas.

Fuente: Los Autores

En la gráfica 2 se puede observar los resultados de dureza de las probetas del **acero sin molibdeno** que fueron tratadas a T1- 60° con concentraciones de 0,6%pe NaCl hasta un 3%pe NaCl en el medio de enfriamiento (El perfil de dureza fue tomado del centro a la periferia).

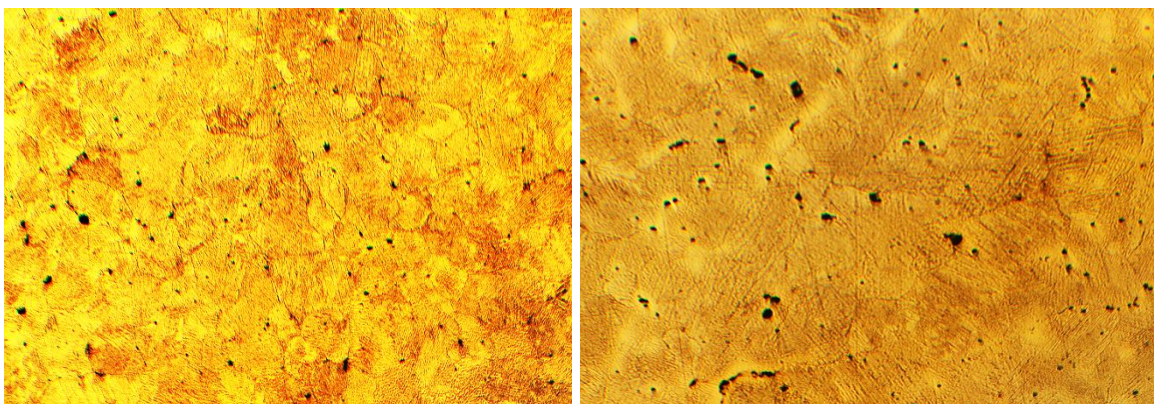
Grafica 2. Resultados de dureza de probetas TT con diferentes concentraciones de NaCl en medio de enfriamiento Fuente: Este estudio  
Fuente: Los Autores



De acuerdo a la gráfica 2, el perfil de dureza de la probeta 8 con concentración de 3% pe de NaCl en el medio de enfriamiento, muestra una mayor homogeneidad en el perfil de dureza y mayores valores de dureza hacia la periferia, con respecto a las demás probetas.

Por otro lado, la homogeneidad del perfil de dureza de la probeta 5 con concentración de 1,2%pe de NaCl en el medio de enfriamiento muestra valores muy estables a lo largo de todo su perfil, pero es más blanda con respecto a la probeta 8. Cabe anotar que en la microestructura los carburos en la probeta con 1,2% de NaCl tienen una morfología alargada y se localizan en los límites de grano, como se muestra en ilustración 13 b; mientras que en la probeta con 3,0% de

NaCl muestra pocos carburos en los límites de grano y en su mayoría se encuentran dispersos en la matriz Austenítica como se muestra en la ilustración 13a



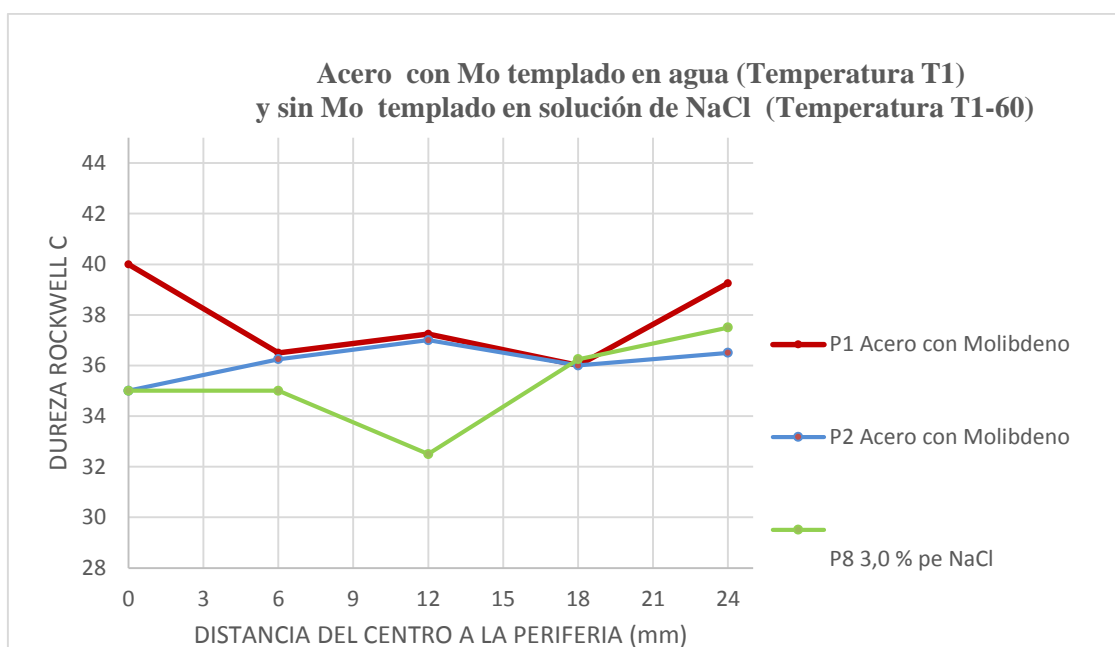
a) Microestructura 3,0% NaCl

b) Microestructura 1,2% NaCl

Ilustración 13 Comparación entre las microestructuras a 100 X  
Fuente: Los Autores

La gráfica 3 compara los tratamientos que presentaron los perfiles de dureza más homogéneos.

Grafica 3. Mejores Perfiles de Dureza TT en Agua y NaCl. Fuente: Los Autores

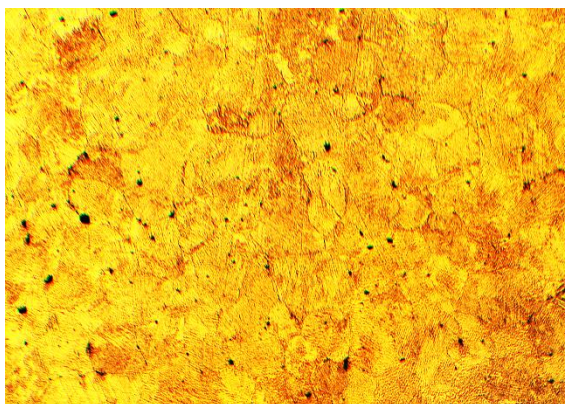


De acuerdo a la gráfica 3 se puede evidenciar que la dureza de la periferia en el tratamiento realizado al acero sin Mo enfriado en solución de NaCl al 3% pe, presenta un valor intermedio al correspondiente al acero con Mo templado a las dos temperaturas T1 y T1-60; pero al acercarse al corazón de la pieza, el acero sin Mo presenta una reducción considerable del valor de dureza respecto al presentado en los tratamientos de los aceros que contienen Mo en su composición, esta reducción se atribuye a la menor templabilidad del acero sin Mo respecto a los que presentan Mo en su composición química, esta reducción también pudo ser mayor si el acero que no tiene Mo se hubiese templado en agua.

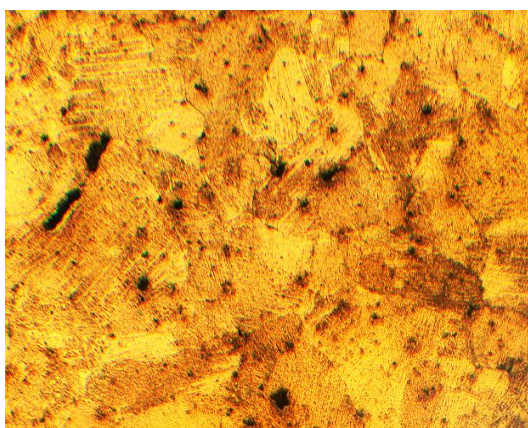
Aunque a 12 mm de distancia en el acero sin Mo se presenta un decrecimiento en el valor de dureza, los valores de dureza que se acercan al centro de la pieza no presentan tanta diferencia a los correspondientes de los aceros que tienen Mo en su composición. Para evaluar la influencia del decremento de la dureza experimentada por el acero que no contiene Mo en el punto a 12 mm de distancia se recomienda realizar un ensayo de impacto Charpy a una probeta que tenga Mo en su composición y la correspondiente a la que no tiene Mo tratada con NaCl al 3% pe para evidenciar como estos cambios de dureza afectan la tenacidad del material.



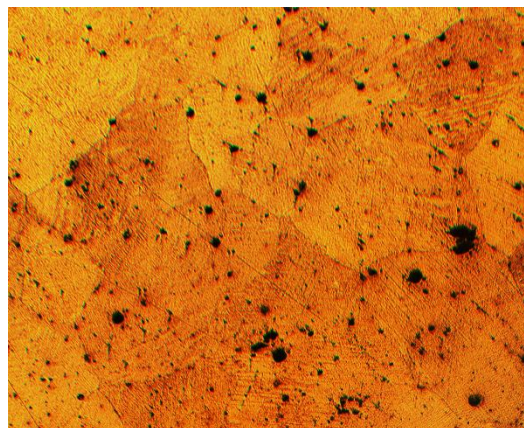
Ilustración 14 Comparación de las microestructuras de los tratamientos que presentaron mayor homogeneidad en el perfil de dureza. Fuente: Los Autores



a) Microestructura 3,0% NaCl



b) T1 acero con Mo



c) T1- 60°C Acero con Mo

Al comparar las microestructuras de los aceros que presentaron la mayor homogeneidad en el perfil de dureza se puede evidenciar que el mejor endurecimiento por dispersión lo presentaron las ilustraciones 13a y 13c; ya que presentaron los carburos con una morfología más circular que los evidenciados en la figura 13b. La diferencia en las figuras 13a y 13c radica en los tamaños de los carburos, presentando la figura 13a carburos de tamaño más fino, condición que beneficia el endurecimiento por dispersión del material, porque provee obstáculos efectivos al movimiento de

las dislocaciones, promoviendo el mecanismo de endurecimiento (Askeland, 2013) esto explica la razón por la que el acero tratado con NaCl al 3 % presentó mayor valor dureza en la periferia que el que contenía Mo y fue templado a T1-60 °C.

## CONCLUSIONES

1. El perfil de dureza más homogéneo respecto al acero T.T. con NaCl y que presenta el menor tamaño de grano, se encontró en la probeta Numero 8 la cual fue enfriada en una solución con concentración de 3%pe de NaCl, este medio de enfriamiento es ideal para obtener una microestructura con pocos carburos en los límites de grano según la fotomicrografía de la probeta número 8.
2. La temperatura de tratamiento térmico fue menor que la utilizada normalmente en Industrias Magma, lo cual indica que se podría llegar a reducir el consumo de energía utilizada en el tiempo de permanencia en el horno, para los martillos que se fabrican en industrias Magma y teniendo en cuenta el espesor de cada pieza seria provechoso el reducir dicho consumo energético.
3. Se puede observar que la probeta N° 2 con molibdeno y T.T. a T1-60°C presento un perfil de dureza promedio más homogéneo a temperatura más baja y menor cantidad de carburos sin disolver en los límites de grano, además de un tamaño de grano menor con respecto a la probeta que se Trata térmicamente en Industrias Magma



4. La solución salina mostro perfiles de dureza más bajos al no utilizar el molibdeno, pero favoreció la homogeneidad de dichos perfiles de dureza al igual que la mejora en los tamaños de grano, los cuales probablemente mejoren la ductilidad del material de los martillos.
5. Al observar los análisis químicos de los dos aceros, con y sin molibdeno y comparándolos con la Norma ASTM A 128 para aceros austeníticos, se puede decir que las composiciones químicas no corresponden a un grupo en específico y por ende el material fabricado en industrias Magma no se puede catalogar según los grados A, B1, B2, B3, B4, C, D, E1, E2 y F nombrados en dicha norma.

## **RECOMENDACIONES**

### **Industrias Magma**

1. Emplear una temperatura inferior en el proceso del temple para obtener un tamaño de grano más fino.
2. Revisar parámetros en proceso de fundición para obtener piezas que cumplan con la norma de aceros Hadfield, en contenido de elementos aleantes.
3. Implementar contenidos de sal no mayores al 3% en la solución del temple junto con un sistema que permita recircular el medio de enfriamiento, con el propósito de obtener un enfriamiento más eficaz de las piezas.
4. Si se desea trabajar con el medio enfriamiento planteado, es importante, mantener los niveles de cromo con el fin de evitar la corrosión. Y cumplir con el estándar ASTM A128

## Laboratorio Materiales Universidad ECCI

5. Se requiere para el durómetro de banco del laboratorio de materiales de la universidad ECCI una porta probetas que permita realizar toma de datos en piezas de mayor tamaño, con el fin de asegurar la confiabilidad de los resultados.
6. Es indispensable contar con una cortadora metalográfica adecuada en el laboratorio y los insumos pertinentes para el trabajo en diferentes materiales.
7. Asegurar la calibración de los instrumentos del laboratorio que sean dispuestos para investigación y desarrollo de productos de la universidad, a fin de mostrar el laboratorio de la universidad como un ente competente en el ámbito de la ingeniería.

## GLOSARIO

**ACERO:** Aleación de hierro y carbono, en diferentes proporciones, que, según su tratamiento, adquiere especial elasticidad, dureza o resistencia.<sup>i</sup>

**TRATAMIENTO TERMICO:** Se conoce como tratamiento térmico al conjunto de operaciones de calentamiento y enfriamiento, bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo de permanencia, velocidad, presión, etc., de los metales o las aleaciones en estado sólido, con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, especialmente la dureza, la resistencia y la elasticidad.<sup>ii</sup>

**TEMPLE:** Es un tratamiento térmico consistente en el rápido enfriamiento de la pieza para obtener determinadas propiedades de los materiales. Se evita que los procesos de baja temperatura, tales como transformaciones de fase, se produzcan al sólo proporcionar una

estrecha ventana de tiempo en el que la reacción es a la vez favorable termodinámicamente y posible cinéticamente.

En metalurgia, es comúnmente utilizado para endurecer el acero mediante la introducción de martensita, en cuyo caso el acero debe ser enfriado rápidamente a través de su punto eutectoide, la temperatura a la que la Austenita se vuelve inestable.<sup>iii</sup>

**REVENIDO:** Es un tratamiento complementario del temple, que regularmente sigue a éste. A la unión de los dos tratamientos también se le llama "bonificado". El tratamiento de revenido consiste en calentar al acero seguido del normalizado o templado, a una temperatura menor al punto crítico, seguido de un enfriamiento controlado que puede ser rápido cuando se deseen resultados elevados en tenacidad, o lento, para reducir al máximo las tensiones térmicas que puedan causar deformaciones.<sup>iv</sup>

**NORMALIZADO:** Es un tratamiento térmico que se emplea para dar al acero una estructura y características tecnológicas que se consideran el estado natural o final del material que fue sometido a trabajos de forja, laminación o tratamientos defectuosos. Se hace como preparación de la pieza para el temple.

El procedimiento consiste en calentar la pieza entre 30 y 50 grados centígrados por encima de la temperatura crítica superior, tanto para aceros hipereutectoides, como para aceros hipoeutectoides, y mantener esa temperatura el tiempo suficiente para conseguir la transformación completa en Austenita. A continuación se deja enfriar en aire tranquilo, obteniéndose una estructura uniforme.<sup>v</sup>

**ESPECTROMETRÍA DE CHISPA O ARCO:** Se usa para el análisis de elementos metálicos en muestras sólidas. Para materiales no conductores, se usa polvo de grafito para hacer conductora la muestra. En los métodos de espectroscopia de arco tradicionales se usa una

muestra sólida que es destruida durante el análisis. Un arco eléctrico o chispa se pasan por la muestra, calentándola a alta temperatura para excitar los átomos. Los átomos de analito excitado emiten luz en varias longitudes de onda que pueden ser detectadas mediante métodos espectroscópicos comunes. Ya que las condiciones que producen la emisión por arco no son controladas cuantitativamente, el análisis de los elementos es cualitativo. Hoy día, las fuentes de chispa con descargas controladas bajo una atmósfera de argón permiten que este método pueda ser considerado eminentemente cuantitativo, y su uso está muy extendido en los laboratorios de control de producción de fundiciones y acerías.<sup>vi</sup>

**MÉTODO PDA:** el método PDA (Pulse Height Distribution Analysis = análisis de distribución de altura de pulsos) en su configuración básica, método que mejora notablemente la exactitud y precisión de los análisis por espectrofotometría de chispa.<sup>vii</sup>

## REFERENCIAS

Ashok, K. S., & Karabi, D. (2008). Microestructural characterization of Hadfield Austenitic.

*Journal of Materials Science* , 43, 5654-5658.

Askeland, D. R. (2013). *Ciencia e Ingeniería de los materiales*. Mexico, D.F.: CENGAGE Learning.

*ASM Handbook Vol 1, Properties and Selection: Irons, steels and High Performance Alloys.*

p1274. (2005). Novelty, Ohio, United States: ASM International.

Barreiro, J. A. (2000). *Tratamiento térmicos de los aceros*. Madrid-España: Dossat.

C., D. Y. (1981). Mechanism of work hardening in Hadfield manganese steel. *Metallurgical and materials transaction A*, 12, 749-759.

callister. (2009). *Introduccion a la Ciencia de los Materiales Ed 8th pp.* 330.

E., C. I. (Junio de 2004). *Aceros Austeniticos al Manganeso. Breve reseña Historica*. Recuperado el 02 de 2016, de [http://metalurgia.usach.cl/sites/metalurgica/files/paginas/2\\_-\\_aceros\\_austeniticos\\_al\\_manganeso\\_breve\\_resena\\_historica\\_carlos\\_iglesias\\_t\\_bernd\\_schulz.pdf](http://metalurgia.usach.cl/sites/metalurgica/files/paginas/2_-_aceros_austeniticos_al_manganeso_breve_resena_historica_carlos_iglesias_t_bernd_schulz.pdf)

G.M., O. W. (1998). strain Again of Austenitic Hadfield manganese steel. *Acta Materialia*, 47, 111-126.

Giraldo, A. v. (s.f.). *aprendeonline.udea.edu.co*. Recuperado el 02 de 2016, de <http://aprendeonline.udea.edu.co/revistas/index.php/materiales/article/viewFile/13224/11859>

Hadfield, R. A. ( 10 August 1917). Manufacture of manganese steel. *United States Patente 1*, 310,528.

Handbook, A. (1993). *Properties and Selection: irons, steels, and High-performance* (Vol. 43). Ohio: ASM International.

ICONTEC. (2002). Norma Tecnica Colombiana NTC 1174. Bogota Apartado 14237: Instituto Colombiano de Normas Tecnicas y Certificacion .

KALPAKJIAN, S. (2008). Aleaciones metálicas Estructuras y reforzamiento mediante Tratamiento Termico. En *Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta edición* (págs. 114-144). México: PEARSON EDUCACIÓN.

Limooei, S. H. (2011). Optimization of Heat Treatment to Obtain Desired Mechanical. *World Applied Sciences Journal* , 15 (10), 1421-1424.

Limooei, S. H. (2014). Iterative Taguchi Analysis: Optimizing the Grain Boundary Carbide in hadfield steel. *Applied Mechanics and Materials*, 598, 38-42.

Materials Science and Engineering, Advanced Refractory Technologies. Art 3B. (2009).

Moghaddam, E. G., Varahram, N., & Davami, P. (2011). On the comparison of microstructural characteristics and mechanical properties of high-vanadium austenitic manganese steels with the Hadfield steel. *Materials science and engineering A*, 532, 260-266.

Tianfu, J., & Fucheng, Z. (1997). The work-hardening behaviour of medium manganese steel under impact abrasive wear condition. *Materials Letters*, 31, 275-279.

Weilin Yan, L. F. (2007). Effect of surface work hardening on wear behavior of Hadfield steel. *ELSEVIER MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING A*, 460–461, 542–549.

William D. Callister, J. (2001). *Material Science Engineering Introduction*. Salt Lake City- Utah EE.UU.: John Wiley & Sons, Inc.

## ANEXOS

### Anexo 1. Análisis químico Industrias Magma Acero ASTM A128 con Molibdeno

Analysis Report 10/15/15 11:02:24 AM

Method: AFSRMV Sample Name: COLADA 0290  
 Run Time: 10/15/15 10:58:44  
 Comment: INDUSTRIA MAGMA  
 Model: CONC Corr. Factor: 1

Elem	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
Avg	1,242	12,87	,0356	.0112	.5065	1,972	.1596
#1	1,248	12,94	,0358	,0116	.5184	1,984	.1610
#2	1,235	12,79	,0354	,0109	.4947	1,960	.1575

Elem	Cu	Mo	Al	Base
Avg	<,0010	.2972	.1458	82,765
#1	<,0010	.2996	,1510	82,645
#2	<,0010	.2948	,1405	82,886

Martillo Tipo Orión

Accepted ☒ No Accepted ☐

Fullr. ☐ ☒

Monitor de Calidad ☐ Coord. Tecn. Calidad ☒



## Anexo 2. Análisis Químico Industrias Magma Acero ASTM A128 sin Molibdeno

Elem	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
Avg	1.190	13.27	.0383	.0121	.4029	1.483	.0674
#1	1.198	13.38	.0387	.0123	.4091	1.489	.0680
#2	1.182	13.16	.0379	.0120	.3967	1.477	.0668
Elem	Cu	Mo	Al	Base			
Avg	.0288	.0893	.0324	83.384			
#1	.0340	.0912	.0299	83.277			
#2	.0235	.0871	.0349	83.492			

Metalurgica Construcel Colombia S.A.							
Analysis Report				02/29/16 01:03:01 PM		page	
Method: ACERMN		Sample Name: COLADA 16-055			Operator: JFO		
Run Time: 02/29/16 13:01:11							
Comment: INDUSTRIAS MAGMA							
Mode: CONC Corr. Factor: 1							
Elem	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
Avg	1.214	13.46	.0391	.0112	.4075	1.437	.0456
#1	1.217	13.37	.0382	.0111	.4018	1.433	.0461
#2	1.211	13.55	.0399	.0114	.4132	1.440	.0451
Elem	Cu	Mo	Al	Base			
Avg	.0342	.0499	.0638	83.238			
#1	.0326	.0499	.0588	83.342			
#2	.0357	.0500	.0688	83.135			

## Web grafía vocabulario

<sup>i</sup> <http://lema.rae.es/drae/?val=ACERO><sup>ii</sup> [http://es.wikipedia.org/wiki/Tratamiento\\_t%C3%A9rmico](http://es.wikipedia.org/wiki/Tratamiento_t%C3%A9rmico)<sup>iii</sup> [http://es.wikipedia.org/wiki/Templado\\_del\\_acero](http://es.wikipedia.org/wiki/Templado_del_acero)<sup>iv</sup> <http://es.wikipedia.org/wiki/Revenido><sup>v</sup> <http://es.wikipedia.org/wiki/Normalizado><sup>vi</sup> [http://www.espectrometria.com/tipos\\_de\\_espectrometria](http://www.espectrometria.com/tipos_de_espectrometria)<sup>vii</sup> <http://www.jenck.com/productos/?idSubtecnica=14&idProducto=114>